

## 이매패류 3종의 크기 및 수온에 따른 여수율과 노닐페놀 흡수율의 관계

양송이 · 이종현<sup>1</sup> · 이병권\*

전남대학교 해양학과

<sup>1</sup>(주) 네오엔비즈 환경안전연구소

### Relationship of the Clearance Rate and Nonylphenol Uptake Rate of Three Bivalve Species with Different Size Classes and Temperatures

SONGYI YANG, JONG HYEON LEE<sup>1</sup> AND BYEONG GWEON LEE\*

Department of Oceanography, College of Natural Science, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

<sup>1</sup>Neo Environmental Business Co., Bucheon, Gyeonggi-Do 420-806, Korea

본 연구에서는 두 개의 크기집단의 바지락(*Ruditapes philippinarum*), 재첩(*Corbicula japonica*), 홍합(*Mytilus edulis*)을 세 개의 수온 조건(5, 13 그리고 18 °C)에서 용존 노닐페놀에 노출시킴으로써 개체 크기와 수온 변화가 여수율과 용존 노닐페놀 흡수율에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 통해 이매패류의 여수율과 유기화합물질 흡수과정의 관련성에 대해 평가하고자 하였다. 단위무게당 여수율(CR<sub>w</sub>)은 모든 개체 크기와 온도 범위에서 홍합(0.3-4.9 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)이 가장 높았으며, 재첩(0.44-1.98 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), 바지락(0.08-0.6 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) 순으로 나타났다. 한편 단위무게당 노닐페놀의 흡수율은 종 간 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 단위무게당 여수율과 노닐페놀 흡수율은 일반적으로 개체의 크기가 증가함에 따라 감소하고, 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 세 종 모두에서 노닐페놀 흡수율은 여수율과 높은 상관관계를 보였다. 한편 노닐페놀 흡수율은 같은 여수율 범위에서 홍합, 재첩, 바지락 순으로 증가하였다. 여수율과 노닐페놀 흡수율의 높은 상관관계로부터 여수율이 이매패류의 용존 유기화합물 흡수에 중요한 역할을 한다는 것을 추정할 수 있다.

The present study was conducted to evaluate relationship between nonylphenol uptake rate and clearance rate of *Ruditapes philippinarum*, *Corbicula japonica* and *Mytilus edulis*. Variation of the temperature and body size of the bivalves was used to modulate clearance rate and nonylphenol uptake rate in this experiment. Clearance rate and nonylphenol uptake rate experiments were determined for two different size classes of the bivalves (*R. philippinarum*: 0.35, 0.73 g, *C. japonica* : 0.047, 0.1000g, *M. edulis*: 0.30, 0.37 g; mean flesh dry weight) and three different temperature regime (5, 13 and 18 °C). Weight-specific clearance rate in all animal size and temperature ranges increased in the order of *R. philippinarum*, *C. japonica* and *M. edulis*. The weight-specific nonylphenol uptake rate did not show specific trend among species. The clearance rate and nonylphenol uptake rate generally decreased with animal size and increased with water temperature. For all three species nonylphenol uptake rate had a strong relationship with clearance rate. For a given clearance rate ranges, the nonylphenol uptake rate was in the order of *R. philippinarum* > *C. japonica* > *M. edulis*. The results suggest that water ventilation capacity of filter-feeding organisms is an important physiological factor controlling uptake rate of dissolved nonylphenol.

**Key words:** Bivalve, Clearance rate, Nonylphenol, Uptake rate, Temperature

#### 서 론

수서환경의 주요생물인 이매패류는 성장과 생식에 필요한 산소와 먹이 및 영양염류 등을 아가미의 여과작용을 통해 수괴로부터 얻으

수 있으며, 생존을 위한 여과활동 과정에서 용존상과 입자상으로 존재하는 오염물질을 불가피하게 흡수하고 높은 농도로 체내에 축적할 수 있다. 그리고 오염물질에 대해 상당한 내성을 지니고 있어서 서식지역의 오염정도와 오염물질의 생물이용도를 파악할 수 있는 유용한 지표생물로 인식되어 왔으며, 효율적인 연안오염수준을 파악하기 위한 Mussel Watch프로그램에 오염지표생물로 이용되고

Received January 18, 2013; Revised May 21, 2013; Accepted May 22, 2013

\*Corresponding author: blee@chonnam.ac.kr

있다(O'Connor, 2002).

이매패류는 용존오염물질을 효과적으로 흡수하고 체내에 축적할 수 있는데, 이제까지의 연구를 통해 다양한 환경 요인(수온, 염분, pH, 용존 유기물 등)과 생물 요인(개체크기, 상태지수, 연령, 생식주기 등)이 용존 상태 중금속의 생물축적에 영향을 줄 수 있으며(Langston and Spence, 1995), 유기화합물의 생물축적에도 이 요인들이 중요한 영향을 줄 수 있다고 보고되었다(Gilek et al., 1996; Honkanen et al., 2001; Wang and Chow, 2002). 이와 같은 요인들이 생물체 내로의 금속축적 과정에 미치는 영향을 평가하고, 체내 금속축적 농도를 예측하기 위하여 독성역학 모델(toxicokinetic model)을 이용한 연구가 진행되어 왔다(Wang et al., 1996; Lee et al., 1998). 그 중에서도 용존 오염물질의 생물 체내로의 흡수와 일부 요인들 사이의 관계를 확인해보고자 하는 몇몇 연구결과가 보고되었다. Wang et al.(2005)은 녹색담치(*Perna viridis*)의 산소흡수율과 용존 Cd와 Zn 흡수율 사이에 높은 관련성이 있다고 보고하였고, Lee et al.(2004)은 캘리포니아홍합(*Mytilus californianus*)의 여수율과 Cd, Se, Zn 흡수율 사이에 높은 관련성이 있다고 밝히며 금속흡수과정에서의 해수 여과활동의 중요성에 대해 보고하였다. 하지만 용존 금속의 흡수율과 같이 독성역학 모델의 중요한 인자들이 온도나 개체크기에 따라 어떻게 변하는지에 대한 기작은 확실히 밝혀지지 않았으며, 특히나 중금속과는 다른 화학적 특성을 보이고 생물에 대한 영향을 달리하는 유기화합물에 관한 연구는 중금속에 비해 훨씬 연구가 부족한 상황이다.

노닐페놀(Nonylphenol)은 전 세계적으로 계면활성제로서 가장 널리 사용되고 있는 Alkylphenol ethoxylate(APEs)의 분해산물이다. APEs는 주로 펄프, 종이, 농업 용 살충제, 금속, 플라스틱, 세면용품 산업 등에서 세정제로 광범위하게 사용되고 있으며(Ying et al., 2002), 전 세계 생산량의 80%를 노닐페놀의 선구물질인 Nonylphenol ethoxylate(NPEs)이 차지하고 있다(Renner, 1997). 이처럼 많은 양이 생산, 소비되는 NPEs는 하폐수처리과정을 거치지 않은 유출수와 처리장에서 완전히 처리되지 못한 방출수를 통해 수서환경으로 유입되며(Ekelund et al., 1990), 생 분해 과정을 거쳐 노닐페놀을 비롯한 분해산물을 생성하게 된다(Giger et al., 1984). 노닐페놀은 logKow값이 4.48로 친지성이어서 생물농축 되어 독성과 내분비교란 작용을 일으킨다고 알려져 있다(Ahel and Giger, 1993). 홍합을 용존 노닐페놀에 노출시킨 경우 BCF(bioconcentration factor)가 2,740과 4,120였으며, 바지락은 1,958, fathead minnow는 245-380으로 나타나 강한 생물농축특성을 보여주었다(Ekelund et al., 1990; Snyder et al., 2001; Lietti et al., 2007). 그리고 수서환경에서 지속성이 강하여 미국과 일본의 하수처리장 유출수에서 노닐페놀이 각각 0.171-37 µg L<sup>-1</sup>, 0.08-1.24 µg L<sup>-1</sup>이 검출된 바 있다(Ying et al., 2002).

국내에서는 낙동강에서 1991년과 2008년에 페놀류 유출사고가 일어난 전례가 있으며, 연안환경 내 농도조사를 비롯하여 여러 생물종에 대한 노닐페놀의 영향을 평가하는 연구가 진행되어 왔다. 해수와 담수에서 4.0-74.0 ng L<sup>-1</sup>, 95.5-481 ng L<sup>-1</sup> 그리고 퇴적물에서 3.1-74.3 ng g<sup>-1</sup> dry wt.의 농도가 보고되었으며(Li et al., 2004; Choi et al., 2010), 퇴적물을 이용한 독성평가(Choi et al., 2010, Lee et al., 2012)와 더불어 담수어 줄납자루(*Acheilognathus yamatsutae*)에 대한 노닐페놀 축적, 성장 및 생존율(Jin et al., 2008), 요각류(*Tigriopus japonicus*)에 대한 형태, 유전자 발현 및 모계독성영향(Bang et al., 2008)에 대한 보고가 이루어 졌다. 또한 노닐페놀은 내분비계장에

물질로 분류되고 있어서 생식지표를 이용한 연구도 진행되었다. 수컷 Japanese medaka은 50.9 µg L<sup>-1</sup> 이상의 농도에서 vitellogenin을 합성한다고 보고되었고(Kang et al., 2003), 붕어(*Carassius auratus*)와 바지락(*Ruditapes philippinarum*) 등의 수서생물에서 난모세포발달, 성비, intersex, 조직변화 등을 지표로 하여 생식소 발달에 대한 노닐페놀의 영향이 보고된 결과도 존재한다(Lee and Park, 2007; Cho et al., 2007; Hwang et al., 2008; Park and Lee, 2011). 하지만 이들 연구는 환경매질 내 농도분석과 독성평가가 대부분을 차지하고 있으며, 바지락과 지중해홍합(*Mytilus galloprovincialis*)의 용존 노닐페놀의 흡수율( $k_w$ )에 대한 보고(Lietti et al., 2007; Gatidou et al., 2010)만 있을 뿐 각 중별 이매패류의 용존 노닐페놀 흡수기작에 대한 연구는 부족하다.

이매패류의 여과활동과 펌프능력은 수온, 개체크기, 산소농도, 먹이입자 농도 및 고유의 생리리듬 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받을 수 있다고 알려져 있다(Werner and Hollibaugh, 1993; Chung et al., 1999; Riisgard, 2001; Lee and Chung, 2001). 이매패류는 변온동물이기에 여과활동을 비롯하여 번식, 성장, 영양대사, 분포 및 먹이생물의 섭취와 같은 생리생태가 수온변화에 직접적인 영향을 받게 된다. 특히 단위시간당 아가미를 통해 여과되는 물의 양을 나타내는 여수율은 수온상승에 따라 증가된 에너지 대사작용으로 인하여 일정수준까지 증가하다가 다시 감소하게 된다(Wilson and Elkaim, 1991; Sprung, 1995). 또한 개체크기에 따라서 여과작용이 영향을 받을 수 있는데, 개체크기가 증가하면 단위무게당 아가미 표면적이나 대사율이 감소하여 단위무게당 여수율이 감소하게 된다고 보고되고 있다(Riisgard, 2001; Filgueira et al., 2008). 한편 바지락, 재첩(*Corbicula japonica*), 홍합(*Mytilus edulis*) 등의 이매패류는 중별로 서식환경이 다르고 주로 고착생활을 하여 주요 먹이원에서 차이가 있기 때문에 각각의 종마다 고유의 여과능력을 보유하고 있다. 이와 같이 수온과 개체크기의 변화와 중별 여과능력에 의해 여수율은 다양하게 나타날 수 있으며, 이러한 여수율의 변화는 결과적으로 용존 오염물질의 흡수율에 영향을 줄 수 있을 것이라고 예상된다. 본 연구에서는 해양, 하구환경에서 대표적인 이매패류로서 한국, 중국, 일본, 미국, 몇몇 유럽국가에서 서식하고 있는 바지락, 재첩, 홍합을 두 개의 크기집단과 세 개의 수온 조건에서 노닐페놀에 노출시킴으로써 개체 크기와 수온 변화가 세 중별 여수율과 용존 노닐페놀 흡수율에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 통해 이매패류의 여수율과 노닐페놀 흡수과정의 관련성에 대해 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 실험생물

실험에 사용된 바지락은 전남 보성군 벌교면, 일본재첩은 경남 하동군 하동읍 신기리, 홍합은 전남 여수시 돌산읍에서 채집 후 즉시 실험실로 운반하였다. 바지락, 홍합 그리고 재첩을 채집한 지점의 염분은 각각 30 psu와 3 psu였다. 채집된 바지락의 각장은 2.66-4.10 cm, 재첩은 1.51-2.50 cm, 홍합은 2.26-4.79 cm의 크기를 가졌고, 채집된 후 1주일 이내에 실험에 이용하였다. 실험실로 가져온 생물은 폐각의 이물질을 깨끗이 씻어주었으며 바지락과 홍합은 30 psu, 재첩은 3 psu의 해수에서 3가지 실험 온도(5, 13, 18 °C)로 서서히 순차하면서 배양 수온의 변화는 하루 2 °C를 넘지 않도록

하였다. 순치과정에서 미세 규조류 *Phaeodactylum tricornutum*을 먹이로 공급하였고 실험 하루 전에는 먹이를 공급하지 않았다. 실험생물은 각장(평균±표준편차)을 기준으로 바지락은 작은 개체(2.97±0.16 cm), 큰 개체(3.81±0.15 cm)로 나누었고 평균 건중량은 각각 0.35±0.05 g, 0.73±0.09 g이었다. 재첩은 작은 개체와 큰 개체를 1.58±0.04 cm, 2.10±0.16 cm, 홍합은 2.77±0.14 cm, 4.23±0.44 cm 크기로 나누었으며, 평균 건중량은 재첩이 각각 0.047±0.003 g, 0.100±0.022 g, 홍합이 각각 0.30±0.02 g, 0.37±0.10 g이었다. 먹이공급과 여수율 측정에 사용된 미세 규조류 *P. tricornutum*은 광온광염성 플랑크톤으로 대량 배양이 가능하여 먹이 생물로 많이 사용되고 있다. 규조류는 여과한 멸균해수에 f/2 media를 첨가한 배양액에서 배양하였다.

### 여수율 측정

본 연구에서 여수율은 이매패류가 아가미를 통해서 물을 통과시킨 량을 추산하기 위해 측정되었고, 이를 용존 노닐페놀 흡수율과 비교하였다. 여수율은 이매패류가 단위시간당 직경이 4 µm 이상인 입자를 제거한 물의 양으로 정의되며 일정 부피의 배양액 내 부유 플랑크톤의 제거 속도를 이용하여 측정하였다(Widdows, 1985). 여수율 측정시간 동안 플랑크톤농도의 균일화를 위해 일정한 속도로 자석교반기를 회전시켜 배양액을 균질화 시켜 주었고 스크린을 이용해 실험생물과 자석교반기의 거리를 유지해줌으로써 실험생물의 스트레스를 최소화하였다.

각 온도(5, 13, 18 °C)별로 1L비커에 바지락과 홍합은 작은 개체와 큰 개체 각각 1마리씩, 그리고 재첩은 작은 개체 3마리와 큰 개체 1마리씩 넣고, 종마다 4개의 반복수를 두었다. 여수율 측정은 생물 별로 노닐페놀 흡수실험 직전과 직후에 반복하여 이루어졌으며, 실험생물을 넣지 않은 비커를 대조구로 두었다. 각 실험온도에서 순치된 실험생물을 1L의 여과시킨 해수에 넣고 *P. tricornutum*을  $5 \times 10^4$  cells ml<sup>-1</sup>의 농도로 첨가하였다. 다음, 실험생물이 패각을 열고 여과를 시작한 때의 플랑크톤농도를 t=0으로하고, 실험온도와 생물 중에 따라 실험구의 플랑크톤 농도를 1시간에서 2시간동안 주기적으로 측정하였다. 플랑크톤 농도의 측정은 형광측정기를 이용하였으며 현미경으로 계수한 규조류 수와 형광량과의 검정선을 도출하였다. 실험구의 플랑크톤 농도(Y)는 아래의 식과 같이 시간(t)에 따라 지수적으로 감소하였다.

$$Y = C_0 \cdot e^{-b^* \cdot t} \quad (1)$$

Y: 플랑크톤 농도(cells ml<sup>-1</sup>)

C<sub>0</sub>: 실험시작 시(t=0)의 플랑크톤 농도(cells ml<sup>-1</sup>)

b\*: 기울기

t: 실험진행 시간(h)

이 때 구해진 기울기를 다음 식에 적용하여 실험생물의 개체별 여수율(CR<sub>ind</sub>)과 단위무게당 여수율(CR<sub>wt</sub>)을 계산하였다.

$$CR_{ind} = V \cdot b^* \quad (2)$$

$$CR_{wt} = V \cdot b^* \cdot W^{-1} \quad (3)$$

V: 배양액 부피(L)

W: 육질부 건중량(g)

실험생물의 육질부 건중량(flesh dry weight, FDW)은 실험생물당

20개체씩 무작위로 선택하여 패각을 제거한 육질부를 80 °C에서 24 시간 건조한 무게와 각장(shell length, SL)과의 관계식을 이용하여 구하였다. 건중량과 각장의 관계식은 바지락이  $FDW = 0.0136 \cdot SL^{2.97}$ , 재첩이  $FDW = 0.0136 \cdot SL^{2.67}$  홍합이  $FDW = 0.0098 \cdot SL^{2.92}$  였다.

### 용존 nonylphenol 흡수율 측정

용존 노닐페놀의 흡수율은 Lee et al.(1998)의 방법을 응용하여 측정하였다. 필터해수 1 L에 C<sup>14</sup>-Nonylphenol(NP) 2 µCi를 흡수율 측정 2일전에 첨가한 후(용매:실험용액 0.002%) 자석교반기를 이용하여 비커 내 용액을 충분히 균질화 시켜 실험용액을 준비하였다. 여수율 측정 시 사용한 실험생물을 연속적으로 사용하여, 노닐페놀에 1시간(5 °C는 1시간 30분)동안 노출시킨 다음, 모든 실험수조의 생물을 다시 여수율을 측정할 때 생물체내 방사능측정을 위하여 냉동보관 하였다. 노닐페놀 흡수율 측정에서는 식물플랑크톤이 없는 상태에서 용존 노닐페놀의 흡수율을 측정하였다. 이는 식물플랑크톤에 흡착된 노닐페놀의 흡수를 배제하고, 이매패류가 용존된 노닐페놀을 아가미를 통해서 흡수하는 효율을 측정하기 위함이다. 해수 내 노닐페놀의 농도는 생물을 노출시킨 직후, 30분 그리고 1시간 후 비커에서 각각 1 ml씩 분취하여 측정하였다. 노닐페놀 흡수율은 아래의 방정식을 통해 계산되었다.

$$k_u = A_{tiss} \cdot t^{-1} \cdot W^{-1} \cdot A_w^{-1} \quad (4)$$

k<sub>u</sub>: nonylphenol 흡수율(ml g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)

A<sub>tiss</sub>: 이매패류 육질부내 nonylphenol 농도(nmol)

t: 노출 시간(h)

W: 육질부 건중량(g)

A<sub>w</sub>: 실험용액내 nonylphenol 농도(nmol ml<sup>-1</sup>)

노닐페놀 흡수 효율(α<sub>M</sub>)은 노닐페놀 흡수율(k<sub>u</sub>)과 여수율(CR<sub>wt</sub>)과의 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$k_u = \alpha_M \cdot CR_{wt} \cdot 1000 \quad (5)$$

### 방사능과 자료의 분석

생물체내 C<sup>14</sup>-NP의 측정을 위해 실험생물의 패각으로부터 육질부를 분리한 후 습중량을 측정하고, 세포분쇄기(Polytron®)를 이용하여 분쇄하였다. 분쇄된 조직을 약 0.05 g씩 분취하고 scintillation cocktail(Ultima Gold, Packard) 10 ml을 첨가하여 Voltex mixer로 충분히 균질하게 섞이게 하여 Liquid scintillation counter(Packard)에서 방사능을 10분동안 측정하였다.

각 수온 간 여수율과 노닐페놀 흡수율 결과의 유의성 검정과 크기 간 여수율과 노닐페놀 흡수율 결과의 유의성 검정에는 분산분석(ANOVA)을 이용하였다. 여수율과 노닐페놀 흡수율 간의 관계 분석에는 회귀분석(regression analysis)을 이용하였다. 통계적인 유의성은 항상 α=0.05에서 검증되었고, 모든 통계적인 분석은 SPSS를 이용하였다.

## 결 과

### 바지락, 재첩, 홍합의 여수율

바지락, 재첩 그리고 홍합의 여수율을 각 온도와 크기별로 노닐페놀 흡수실험 직전과 직후에 측정하였다. 바지락과 재첩의 직전과

**Table 1.** Shell length (SL), flesh dry weight (FDW) and clearance rate (CR) of three bivalve species, *Ruditapes philippinarum*, *Corbicula japonica* and *Mytilus edulis*. Data show mean  $\pm$  standard deviation (n=4)

Species	Temp. (°C)	Size class	SL (cm)	FDW (g)	CR (L/g/h)
R. philippinarum	5	S	2.91 $\pm$ 0.14	0.32 $\pm$ 0.05	0.18 $\pm$ 0.04
		L	3.73 $\pm$ 0.09	0.68 $\pm$ 0.05	0.08 $\pm$ 0.01
	13	S	2.94 $\pm$ 0.22	0.34 $\pm$ 0.07	0.34 $\pm$ 0.07
		L	3.80 $\pm$ 0.15	0.72 $\pm$ 0.09	0.12 $\pm$ 0.06
	18	S	3.06 $\pm$ 0.11	0.38 $\pm$ 0.04	0.60 $\pm$ 0.12
		L	3.91 $\pm$ 0.16	0.78 $\pm$ 0.10	0.30 $\pm$ 0.14
C. japonica	5	S	1.58 $\pm$ 0.04	0.05 $\pm$ 0.00	0.88 $\pm$ 0.09
		L	2.05 $\pm$ 0.09	0.09 $\pm$ 0.01	0.44 $\pm$ 0.03
	13	S	1.59 $\pm$ 0.03	0.05 $\pm$ 0.00	1.72 $\pm$ 0.28
		L	2.21 $\pm$ 0.21	0.12 $\pm$ 0.03	0.51 $\pm$ 0.21
	18	S	1.59 $\pm$ 0.06	0.05 $\pm$ 0.00	1.98 $\pm$ 0.37
		L	2.03 $\pm$ 0.15	0.09 $\pm$ 0.02	0.79 $\pm$ 0.42
M. edulis	5	S	2.86 $\pm$ 0.21	0.15 $\pm$ 0.03	1.50 $\pm$ 0.76
		L	4.38 $\pm$ 0.16	0.48 $\pm$ 0.05	0.31 $\pm$ 0.10
	13	S	2.82 $\pm$ 0.37	0.14 $\pm$ 0.05	4.90 $\pm$ 1.95
		L	4.41 $\pm$ 0.31	0.49 $\pm$ 0.10	2.78 $\pm$ 1.40
	18	S	2.82 $\pm$ 0.37	0.12 $\pm$ 0.04	3.78 $\pm$ 2.20
		L	4.41 $\pm$ 0.31	0.35 $\pm$ 0.09	2.68 $\pm$ 1.07

직후의 여수율은 대체적으로 유사한 값을 보였지만 홍합의 여수율은 흡수실험 직후에 측정된 여수율이 직전의 값에 비해 다소 낮게 나타났으나 유의한 차이를 나타내지 않았다. 흡수실험 직전과 직후 여수율의 평균값을 노닐페놀 흡수율과의 관계를 분석하는데 이용하였다.

세 종 이매패류의 여수율(CR<sub>w</sub>)은 홍합이 평균 1.5-4.9 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로 가장 높았으며, 다음으로 재첩(0.44-1.98 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), 바지락(0.08-0.6 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) 순으로 나타났다(Table 1). 3개 실험온도에서 바지락, 재첩, 홍합 모두 큰 개체보다 작은 개체의 단위무게당 여수율(CR<sub>w</sub>)이 더 크게 나타났다(Fig. 1). 바지락의 여수율(L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)은 5, 13 °C에서, 재첩은 모든 온도에서 작은 개체와 큰 개체 간에 유의한 차이를 보였다. 홍합은 5 °C에서만 크기별로 여수율이 차이를 나타내었다. 바지락과 재첩의 여수율은 수온이 증가함에 따라 증가하였으나 홍합은 13 °C에서 여수율이 가장 크게 나타났다. 작은 개체구간의 바지락과 재첩의 여수율은 18 °C와 나머지 온도 간에 유의한 차이를 보였으며, 큰 개체구간에서는 바지락이 18 °C와 나머지 온도 간에, 홍합은 5 °C와 나머지 온도 간에 여수율의 유의한 차이를 보였다(Fig. 1).

#### 바지락, 재첩, 홍합의 노닐페놀 흡수율

세 종 이매패류의 노닐페놀 단위무게당 흡수율은 모든 실험온도에서 작은 개체에 비해 큰 개체에서 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 바지락의 노닐페놀 흡수율(L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)은 5, 13 °C에서, 재첩은 모든 온도에서 작은 개체와 큰 개체 간에 유의한 차이를 보였다. 홍합은 5 °C에서만 크기별로 흡수율이 차이를 나타내었다. 바지락과 재첩 모두 수온이 증가함에 따라 흡수율이 증가하였고 흡수율에 대한 수온의 영향은 큰 개체보다 작은 개체에서 뚜렷하게 나타났다. 가장 높은 온도인 18 °C에서의 노닐페놀 흡수율은 5 °C에서의 흡수율과 비교했을 때 바지락은 약 4.5배 증가한 것으로, 여수율의 증가비보다 약간 크게 나타났고, 재첩은 약 2.2배 증가하여 여수율의 증가비와 동일하게 나타났다. 홍합의 13 °C에서 흡수율은 5 °C에서의

값과 비교했을 때 작은 개체와 큰 개체 각각 3.3배, 10배 증가한 것으로 나타났다(Fig. 2).

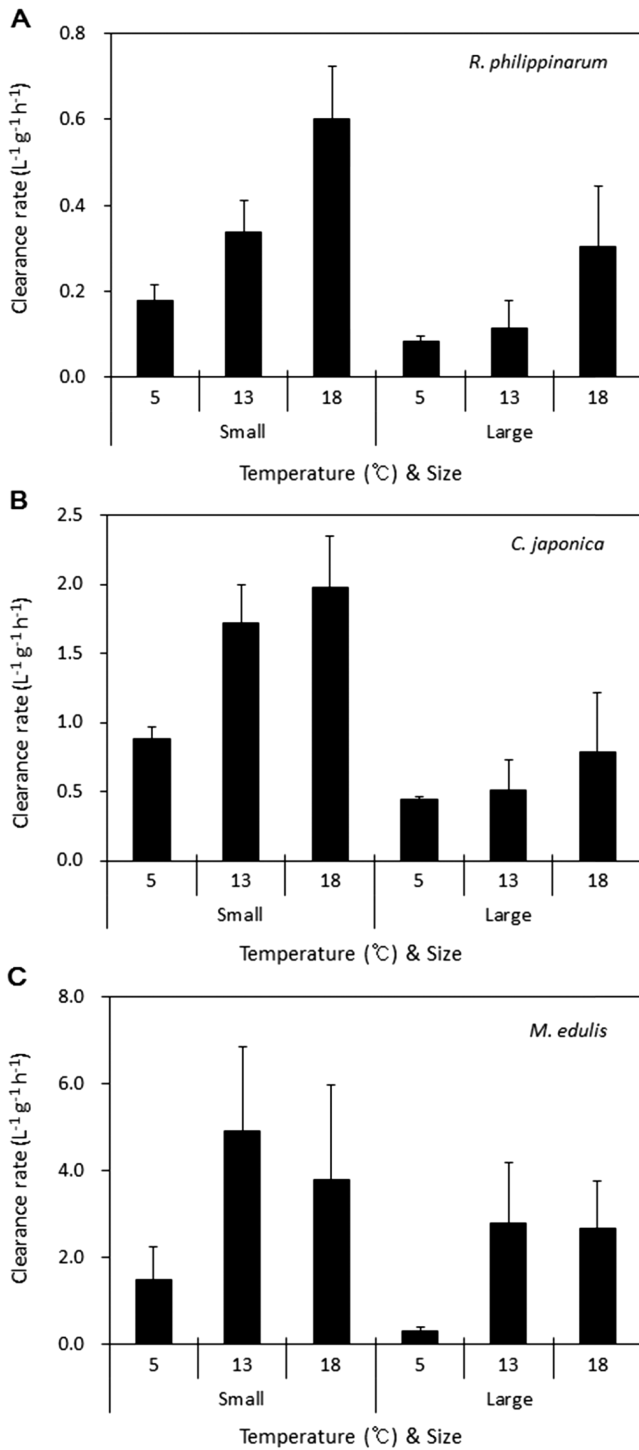
#### 여수율과 노닐페놀 흡수율간의 관계

세 가지 온도구간(5 °C, 13 °C, 18 °C)에서 2개 크기구간(small, large)의 바지락, 재첩 그리고 홍합의 여수율과 노닐페놀 흡수율의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 선형 회귀분석 결과 바지락, 재첩, 홍합의 여수율과 흡수율 간 매우 유의한 관계가 나타났다. 그리고 여수율과 흡수율 관계의 결정계수(r<sup>2</sup>)도 바지락(r<sup>2</sup>=0.95), 재첩(r<sup>2</sup>=0.97) 그리고 홍합(r<sup>2</sup>=0.92) 모두 높게 나타났다. 각각의 선형 관계식에서 기울기는 노닐페놀 흡수효율( $\alpha$ )을 나타내며, 흡수효율은 바지락이 가장 높았고, 재첩, 홍합 순으로 나타났다.

### 토 의

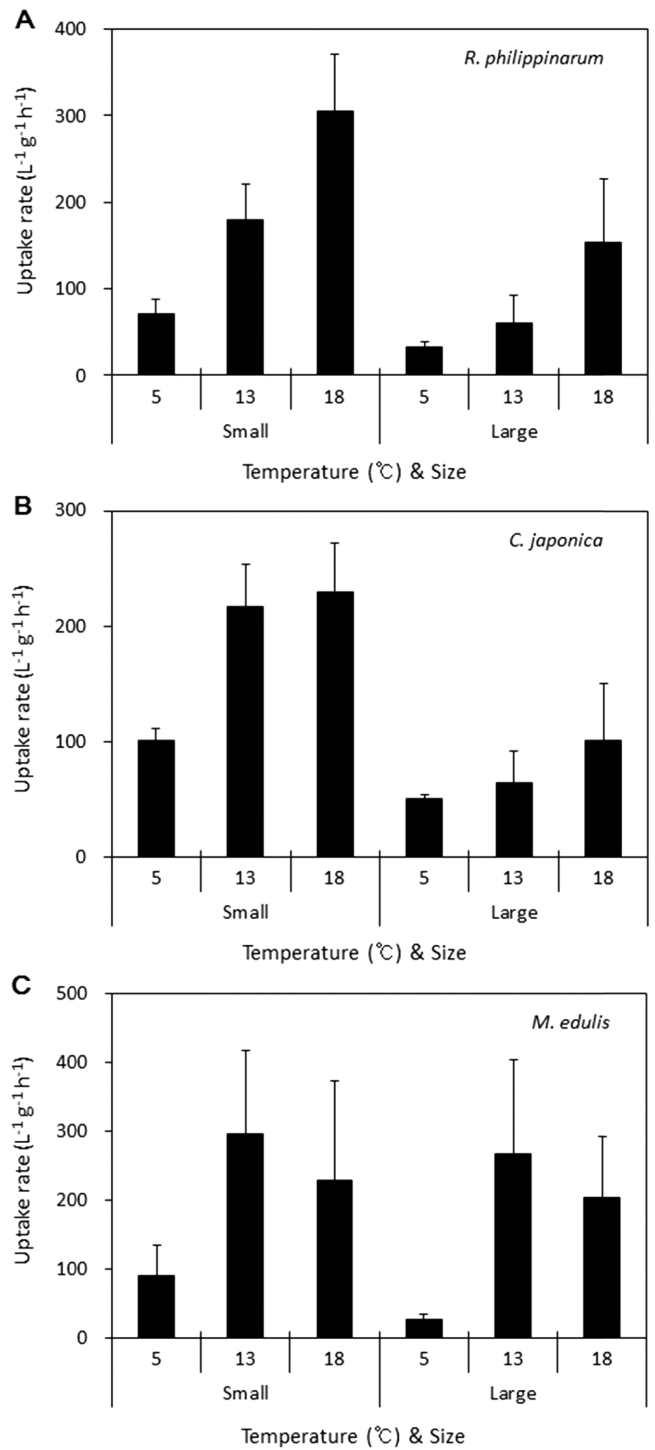
#### 바지락, 재첩, 홍합의 여수율 비교

바지락의 13 °C와 18 °C에서 단위무게당 여수율(CR<sub>w</sub>)은 각각 0.10-0.40, 0.22-0.73 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로 나타났으며 이는 2.8-3.4 cm크기 바지락의 온도변화에 따른 여수율 범위인 약 0.6-3 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>(Shin and Lim, 2003)과 3.0-3.5 cm크기 바지락의 17 °C에서 여수율인 약 0.9-1.3 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>(Matozzo *et al.*, 2003)보다는 낮은 값이다. 재첩의 모든 온도구간에서 여수율은 0.26-2.48 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로, 같은 크기와 온도에서 측정된 여수율인 약 0.2-1.1 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>과 유사한 범위를 보였다(Lee and Lee, 2005). 이는 1.5 cm크기 재첩의 5-35 °C 온도 구간에서의 여수율인 약 1.5-9 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>보다 낮은 값이다(Lim *et al.*, 2005). 홍합의 여수율은 0.18-7.62 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>로 계절별 온도변화에 따른 여수율 변화범위인 0.2-9.4 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>과 유사하게 나타났다(Strohmeier *et al.*, 2009). 세 종 이매패류의 단위무게당 여수율(CR<sub>w</sub>)은 홍합, 재첩 그리고 바지락 순으로 나타나 종별 차이를 보여 주었다. 이는 생태적 차이로 설명할 수 있는데 홍합은 조간대에서



**Fig. 1.** Mean weight-specific clearance rates ( $L\ g^{-1}\ h^{-1}$ ) of three bivalve species, *Ruditapes philippinarum* (A), *Corbicula japonica* (B) and *Mytilus edulis* (C) with two size classes (small, large) at three different temperatures (5, 13 and 18 °C). Error bars represent standard deviation (n=4).

암반이나 고형물에 부착하여 해수중의 유기물을 여과하여 먹이로 이용하는 여과식자로서 생존에 필요한 모든 유기물을 여과활동으로 섭취해야 하기 때문에, 기수역 모래펄과 갯벌에서 서식하는 기수 재첩과 바지락과 같이 해수여과와 유기물섭취를 위한 퇴적물섭식



**Fig. 2.** Nonylphenol uptake rates ( $L\ g^{-1}\ h^{-1}$ ) of three bivalve species, *Ruditapes philippinarum* (A), *Corbicula japonica* (B) and *Mytilus edulis* (C) with two size classes (small, large) at three different temperatures (5, 13 and 18 °C). Error bars represent standard deviation (n=4).

을 같이하는 다른 두 종에 비해 높은 여수율을 나타낸 것으로 예상할 수 있다. 그리고 이매패류는 아가미의 새사(branchial filaments)에서 먹이입자를 거르며 종마다 이 새사 사이의 간격에 차이가 있어서 입자크기에 따라 여과효율이 달라진다. 홍합은 4 μm 이상 크

기의 입자만 여과할 수 있으며(Möhlenberg and Riisgard, 1978), 바지락은 1.4-2.0  $\mu\text{m}$  크기의 먹이를 최대효율로 여과할 수 있다고 보고되었다(Tezuka *et al.*, 2009). 이와 같은 각 종별 구조적인 차이도 여수율 차이에 영향을 미칠 수 있을 것이다.

그 동안 많은 연구를 통해 이매패류의 여수율은 실험에 사용된 부유생물의 농도와 종, 측정시간, 용존산소, 실험디자인(유수식, 정수식)과 생리활동에 영향을 미치는 내인성 요인 등에 의해 결과가 달라질 수 있음이 밝혀졌다(Werner and Hollibaugh, 1993; Chung *et al.*, 1999; Riisgard, 2001; Lee and Chung, 2001). Lee and Chung (2001)은 갈색새알조개(*Glauconome chinensis*)의 여수율측정 전 먹이를 1-2일 동안 주지 않는 경우 여수율이 2-3배 증가하고, 측정시간이 증가함에 따라 여수율이 감소하기 때문에 여수율 측정은 1-4 시간이 적당하다고 하였다. 또한 부유생물의 농도가  $2.0 \times 10^3$  cells  $\text{ml}^{-1}$ 에서  $4.9 \times 10^3$  cells  $\text{ml}^{-1}$ 로 높아지면 여수율 최대값이 2배 증가하였지만 부유생물 농도가  $6.5 \times 10^4$  cells  $\text{ml}^{-1}$ 로 더 높아지면 오히려 여수율이 감소한다고 하였다. 하지만 실험생물과 실험조건에 따라 여수율 측정을 위한 최적의 부유생물 농도가 달라질 수 있다고 하였다. 이상의 결과는 각 연구마다 여수율 측정조건이 달랐기 때문에 본 연구에서 얻은 여수율 결과와 기존 연구결과 사이에서의 차이가 생긴 것을 잘 설명해주고 있다. 또한 노닐페놀 흡수실험 직후의 여수율이 약간 낮아진 것은 측정시점이 오전에서 오후가 되면서 생물이 고유적으로 지니고 있는 조식리듬에 따른 여수능력의 변화가 영향을 주었을 것으로 추정된다(Chung *et al.*, 1999). 하지만 노닐페놀 흡수실험 직전과 직후의 여수율 값이 일관되게 나타났으며, 본 연구에서는 여수율의 절대적인 값보다는 상대적으로 여수율의 변화가 노닐페놀 흡수율에 미치는 영향을 조사하는 것이 더 큰 목적이기 때문에 본 실험의 여수율 측정조건이 적절한 것으로 보인다.

### 여수율에 대한 수온과 개체 크기의 영향

바지락과 채집은 온도가 증가함에 따라 여수율이 증가하였다. 여수율과 수온과는 관계가 적다는 연구결과가 존재하긴 하지만(Reeder and Bij, 1990), 수온이 증가함에 따라 이매패류의 여수율도 증가한다는 많은 연구결과와 일치한다(Sprung, 1995; Sylvester *et al.*, 2005). 변온동물인 이매패류는 대사과정을 통한 열 발생이 없고 외부의 열에 의지하므로 저온에서는 생물이 스트레스를 받아 생리활동에 제약이 생기며 아가미의 섬모운동이 약화되어 여수율이 현저히 낮아질 수 있다. 그러므로 본 연구에서도 개체 크기에 관계없이 5°C에서 전반적으로 낮은 여수율이 나타난 것으로 생각된다. 그동안 수온 증가에 따른 여수율의 증가경향에 대해  $Q_{10}$ 의 원리가 적용된다고 알려졌다(Robinson *et al.*, 1983).  $Q_{10}$ 의 원리란 임의 온도에서 생물의 신진대사율을 10°C 낮은 온도에서의 신진대사율과 비교한 값으로 온도 10°C 증가에 따라 신진대사율이 2-3배가 증가한다는 원리이다. 본 연구결과에 따르면 바지락과 채집의 작은 개체의 여수율에 대한 온도계수  $Q_{10}$  값은 5-18°C 범위에서 각각 2.6, 1.8 이었으며, 큰 개체의 여수율에 대한  $Q_{10}$  값은 5-18°C 범위에서 각각 2.8, 1.6으로 나타나 기존의 연구결과와 일치하였다. 또한 수온과 점성은 반비례 관계에 있으므로 수온이 낮으면 점성이 높아져 여과과정에서 마찰력을 증가시킬 수 있어서, 수온감소에 따른 낮은 여수율에 대하여 점성으로 설명할 수 있다는 보고가 있다(Jørgensen *et al.*, 1990; Podolsky, 1994). 기존연구에서 수온 내성

범위를 벗어나게 되면 여수율이 급격하게 떨어지는 결과가 나타났으나(Shin and Lim., 2003; Lee and Lee, 2005), 본 연구에서 그러한 결과는 나오지 않았기 때문에 실험생물의 수온 내성범위 안에서 실험을 하였다고 여겨진다.

여수율에 대한 개체크기의 영향은 모든 실험온도에서 무게가 증가함에 따라 여수율이 감소하는 경향을 통해 확인할 수 있었으며, 이는 기존 연구에서 확인할 수 있는 현상이다(Riisgard, 2001; Filgueira *et al.*, 2008). 이와 같은 관계는 개체의 크기가 증가할수록 단위무게당 대사요구량이 낮아 여수율이 감소한다고 설명될 수 있다. 또한 개체크기가 증가함에 따라 크기에 대한 아가미 표면적의 비가 감소하기 때문에 그에 따른 여수율도 감소한다는 보고도 있다(Johnes *et al.*, 1992; Filgueira *et al.*, 2008).

여수율은 본 연구결과와 같은 중별차이뿐만 아니라 같은 종 내에서 개체 간 차이가 광범위하게 나타날 수 있다. 채집의 작은 개체구간에 비해 큰 개체구간에서의 온도변화에 따른 여수율이 유의한 차이를 보이지 않은 것은 개체크기가 클수록 개체 간 변이가 커지는 경향 때문으로 보이며 기존 연구결과에서도 이 같은 경향을 볼 수 있다(Sylvester *et al.*, 2005).

### 노닐페놀 흡수율에 대한 수온과 개체 크기의 영향

흡수율( $k_u$ )은 실험용액내 오염물질의 농도에 따라 변하고(Eq. 4), 이는 흡수효율과 여수율의 관계로 표현될 수 있다(Eq. 5). 기존 연구에서는 흡수율이 실험용액내 물질의 농도와 비례관계에 있다고 여겨 이미패류를 오염물질의 생물이용도를 측정하기 위한 생물지시자로 이용하였다. 그리고 흡수율은 용존 오염물질의 생물이용도를 구하는데 이용되었고, 각각 다른 용존 오염물질의 농도를 이용하여 구할 수 있었다(Wang *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1998). 흡수율은 환경적인 요인(수온 등)과 생물학적인 요인(개체 크기, 여수율 등)에 의해 영향을 받을 수 있다(Wang, 2001; Lee and Lee, 2005). 본 연구의 노닐페놀 흡수율( $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )은 온도가 증가할수록, 개체 크기가 작을수록 증가하는 일반적인 경향이 나타나기도 하였으나, 여수율 결과처럼 중별, 종내 차이를 보여주었다. 바지락은 33.1-304.3  $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$ , 채집은 50.6-230.3  $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$  그리고 홍합은 26.6-295.9  $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 의 흡수율 값을 나타냈는데, 이는 중금속에 대한 이매패류의 흡수율에 비해 수십 배 이상 높은 값이다(Wang, 2001; Lee and Lee, 2005). 그리고 노닐페놀에 대한 바지락과 지중해홍합의 흡수율 13.8  $\text{ml g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 과 0.067  $\text{ml g}^{-1} \text{h}^{-1}$  보다 낮거나 비슷한 값을 보였으나(Liotti *et al.*, 2007; Gatidoua *et al.*, 2010), 본 실험에서는 노출시간을 1-2시간으로 제한한 것에 비해 이들 결과는 7일 이상을 노출시킨 흡수율 결과이며, 계산에 대입한 생물중량도 건중량 또는 습중량을 이용하였기 때문에 직접적인 비교는 할 수 없을 것으로 사료된다. 용존 노닐페놀의 흡수율에 대한 기존연구결과가 충분하지 않아 다른 용존 유기화합물의 흡수율 값과 비교했을 때, BaP (benzo[a]pyrene)에 대한 녹색담치(*Perna viridis*)의 흡수율(0.26  $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )보다 높았으며(Wang and Chow, 2002), 노닐페놀과 같이 내분비계 장애물질로 분류되는 Bisphenol A에 대한 담수패류 *Pisidium amnicum*의 흡수율(1.49-6.55  $\text{ml g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )(Heinonen *et al.*, 2002)과 PCBs와 PAHs(polycyclic aromatic hydrocarbons)에 대한 말조개(*Dreissena polymorpha*)의 흡수율( $3.2 \times 10^5$   $\text{L g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )보다 낮은 값을 보였었다(Bruner *et al.*, 1994). 이와 같은 기존 연구 결과와의 차이는 화합물의 종류에 따른  $K_{ow}$ 의 차이, 생물 종에 따른 여수율,

물질의 흡수효율(absorption efficiency), 지질함량과 실험조건(생물의 크기 등)의 차이 때문인 것으로 보인다. 기존의 연구에서 친지성 화합물들의 흡수율은 생물의 지질함량과 밀접한 관련이 있다고 보고한 바 있다(Bruner *et al.*, 1994).

비록 체계적인 연구는 적지만 수온변화와 개체 크기는 생물의 용존 금속의 축적과 깊은 관련이 있는 것으로 여겨져 왔으며, 이는 금속뿐만 아니라 유기화합물등 다른 오염물질에도 해당될 것으로 예상할 수 있다. 일반적으로 수온이 증가할수록 흡수율이 증가하며, 개체 크기가 커질수록 흡수율은 감소한다고 알려져 있지만 이는 실험조건에 따라 다양하게 나타나고 있다. 이와 유사하게 Bruner *et al.*(1994)은 말조개(*Dreissena polymorpha*) 큰 개체(21 mm)에 비해 작은 개체(15 mm)에서 PCBs, PAHs의 2배 이상 빠른 흡수율과 높은 BCF(bioconcentration factor)를 보고하였다. 또한 Honkanen *et al.*(2001)은 연어 알에서 높은 온도일수록 높은 bisphenol A 흡수율과 높은 체내 농도를 보고하였으며, 홍합의 경우 PCB (polychlorinated biphenyl)흡수율이 개체 크기가 증가함에 따라 감소하고 여수율의 변화와 매우 높은 상관성을 보인다는 연구결과(Gilek *et al.*, 1996)도 존재한다. 본 연구결과는 노닐페놀 흡수율에 대한 수온과 개체크기의 영향과 일치하는 경향을 보여주었으며, 이를 통해 오염물질의 흡수와 축적에 관련된 다양한 요소가 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

**여수율과 노닐페놀 흡수율간의 관계**

세 종 이매패류의 노닐페놀 흡수율과 여수율 사이에 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 이를 통해 여수율이 중요한 생리변수가 될 수 있음을 보여주고 있다(Fig. 3). 앞서 언급한 바와 같이 개체 크기나 수온의 변화는 신진대사율, 물의 점성뿐만 아니라 아가미 표면적과 같은 형태적인 특징을 포함한 여러 요인들에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 영향은 수온이나 크기가 다른 조건 하에서 여수율의 변화를 일으킬 수 있으며, 결국 여수율의 변화가 이매패류의 노닐페놀 흡수율 변화의 상당부분을 설명해 줄 수 있을 것으로 생각된다. 특히 여수율과 노닐페놀 흡수율의 관계를 보여주는 함수의 기울기는 노닐페놀 흡수효율( $\alpha_M$ )로 볼 수 있으며, 이는 바지락, 채집 그리고 홍합 순으로 나타났다. 즉 동일한 여수율에서 노닐페놀 흡수율은 바지락이 가장 높았고 채집이 그 다음으로 높은

값을 나타냈으며, 홍합의 흡수율이 가장 낮은 값을 나타내었다. 바지락은 나머지 두 종에 비해 낮은 여수율을 보였는데, 이로 인해 실험용액이 채집과 홍합에 비해 아가미에 접촉하는 시간이 상대적으로 길어져 용존 노닐페놀을 흡수할 기회가 높아졌기 때문에 흡수효율이 가장 높게 나타난 것으로 예상 할 수 있다. Lee and Lee (2005)는 4종 이매패류의 여수율과 카드뮴(Cd), 셀레늄(Se), 아연(Zn) 흡수율과의 관련성을 함께 도시함으로써 본 연구결과와 일치하는 결과인 여수율과 금속 흡수율 간의 유의한 상관관계를 보여 주었고, 종간 흡수율 차이의 원인을 여수율로 추정하였다. 그리고 여수율이 증가하는 만큼 금속 흡수율이 증가하지 않는 것을 여수율 증가에 따른 흡수효율의 감소 때문으로 보았다. 하지만 본 연구에서는 여수율이 증가하는 만큼 노닐페놀 흡수율이 증가하는 정도가 금속흡수율 실험의 결과보다 높게 나타났다. 이는 여과과정을 통한 노닐페놀 흡수 이외에 지용성 화합물들이 가지는 생물 체표면에 대한 높은 흡착성 때문에 생물체내 노닐페놀 농도가 높아졌을 것으로 추정된다. 기존 연구에서 플랑크톤에 대한 phenanthrene 흡수실험 결과 실험시작 후 20분 동안 세포표면으로의 흡착이 먼저 일어나며 몇몇 종에서는 pyrene의 65%이상이 세포표면에 흡착되어 흡수실험의 초기에 높은 흡수율이 나타날 수 있음을 보여주었다(Lei *et al.*, 2002; Fan and Reinfelder, 2003). 바지락, 채집과 홍합을 비롯한 여과식자들의 오염물질 축적에 있어서 여수율은 상당한 영향을 미치는 것으로 판단되며 생물 종에 따른 축적능력과 축적에 영향을 미치는 생물학적, 환경 요인을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

**사 사**

본 연구는 호남씨그랜트사업단 연구개발과제(호남지역 해양환경 보전을 위한 Nonylphenol의 해양생물 축적 및 독성 기작 연구)의 지원으로 연구되었습니다.

**참고문헌(References)**

Ahel, M. and W. Giger, 1993. Partitioning of alkylphenols and alkylphenol polyethoxylates between water and organic solvents. *Chemosphere*, **26**: 1471-1478.

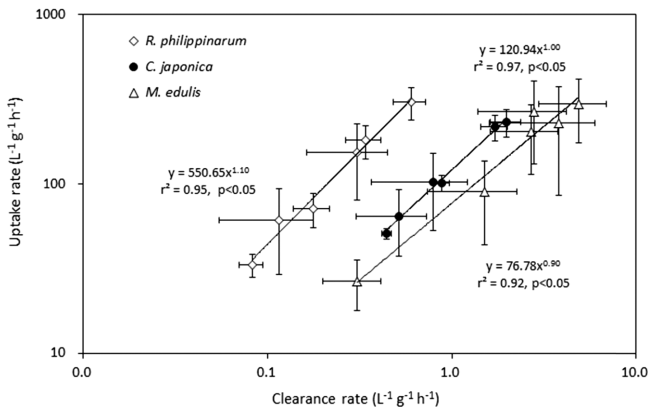
Bang, H.W., W.C. Lee, S.H. Lee, and I.S. Gwak, 2008. Life cycle, morphology and gene expression of harpacticoid copepod, *Tigriopus japonicus s.l.* exposed to 4-nonylphenol. *Korean J. Limnol.*, **41**(1): 81-89.

Bang, H.W., W.C. Lee, and I.S. Gwak, 2008. Ecotoxicological response of offspring from *Tigriopus japonicus s.l.* parents exposure to 4-nonylphenol. *Korean J. Limnol.*, **41**(1): 90-97.

Bruner, K.A., S.W. Fisher, and P.F. Landrum, 1994. The role of the Zebra Mussel, *Dreissena polymorpha*, in contaminant cycling: I. The effect of body size and lipid content on the bioconcentration of PCBs and PAHs. *J. Great Lakes Res.*, **20**(4): 725-734.

Cho, N.G., Y.G. Jin, C.W. Lee, H.M. Kim, K.H. Choi, K.H. Chung, J.C. Kang, and J.S. Lee, 2007. Change of reproductive indicator of the crucian carp, *Carassius auratus*(Teleostei: Cyprinidae) long-term exposed to nonylphenol. *J. Environ. Toxicol.*, **22**(3): 235-245.

Choi, M.K., Y.S. Park, H.B. Moon, J. Yu and H.G. Choi, 2010. Dis-



**Fig. 3.** Relationship between clearance rates and nonylphenol uptake rates ( $L g^{-1} h^{-1}$ ) of three bivalve species, *Ruditapes philippinarum*, *Corbicula japonica* and *Mytilus*. All error bars represent standard deviation (n=4).

- tribution of fecal sterols, nonylphenol, and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Masan bay, Korea. *Fish Aqua Sci.*, **13**(3): 236–243.
- Choi, M.K., S.G. Kim, S.P. Yoon, R.H. Jung, H.B. Moon, J. Yu, and H.G. Choi, 2010. Sediment toxicity of industrialized coastal areas of Korea using bioluminescent marine bacteria fish. *Aquat. Sci.*, **13**(3): 244–253.
- Chung, E.Y., Y.K. Shin, and S.B. Hur, 1999. Physiological rhythms in the oxygen consumption and filtration rates of the Manila Clam, *Ruditapes philippinarum*. *Korean J. Malacology*, **15**: 127–131.
- Ekelund, R., Å. Bergman, Å. Granmo, and M. Berggren, 1990. Bioaccumulation of 4-nonylphenol in marine animals. A re-evaluation. *Environ. Pollut.*, **64**: 107–120.
- Fan, C.W. and J.R. Reinfelder, 2003. Phenanthrene accumulation kinetics in marine diatoms. *Environ. Sci. Technol.*, **37**: 3405–3412.
- Filgueira, R., U. Labarta, and M.J. Fernández-Reiriz, 2008. Effect of condition index on allometric relationships of clearance rate in *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819. *Rev. Biol. Mar. Oceanog.*, **43**(2): 391–398.
- Gatidoua, G., E. Vassaloua, and N.S. Thomaidisb, 2010. Bioconcentration of selected endocrine disrupting compounds in the Mediterranean mussel, *Mytilus galloprovincialis*. *Mar. Pollut. Bull.*, **60**(11): 2111–2116.
- Giger, W., P.H. Brunner, and C. Schaffner, 1984. 4-Nonylphenol in sewage sludge: accumulation of toxic metabolites from non-ionic surfactants. *Science*, **225**: 623–625.
- Gilek, M., M. Björk, and C. Näf, 1996. Influence of body size on the uptake, depuration and bioaccumulation of polychlorinated biphenyl congeners by Baltic Sea blue mussels, *Mytilus edulis*. *Marine Biology*, **125**: 499–510.
- Heinonen, J., J.O. Honkanen, J.V.K. Kukkonen, I.J. Holopainen, 2002. Bisphenol A Accumulation in the Freshwater Clam *Pisidium amnicum* at Low Temperatures. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **43**: 50–55.
- Honkanen, J.O., J. Heinonen, and J.V.K. Kukkonen, 2001. Toxicokinetics of waterborne bisphenol A in landlocked salmon (*Salmo salar* *sebago*) eggs at various temperatures. *Environ. Toxicol. Chem.*, **20**(10): 2296–2302.
- Hwang, I.J., H.B. Kim, and H.J. Baek, 2008. Effects of bisphenol A and nonylphenol on in vitro steroid production in matured oocyte of greenlings, *Hexagrammos agrammus*. *Dev. Reprod. Vol.*, **12**(3): 275–281.
- Ji, J., H.J. Choi, and I.Y. Ahn, 2006. Evaluation of Manila clam *Ruditapes philippinarum* as a sentinel species for metal pollution monitoring in estuarine tidal flats of Korea: Effects of size, sex, and spawning on baseline accumulation. *Mar. Pollut. Bull.*, **52**: 447–468.
- Jin, Y.G., C.H. Kim, C.W. Lee, and J.S. Lee, 2008. Survival rate, growth and NP accumulation of the striped bitterling, *Acheilognathus yamatsutae* long-term exposed to nonylphenol (NP). *J. Fish Pathol.*, **21**(1): 57–66.
- Johns, H.D., O.G. Richards, and T.A. Southern, 1992. Gill dimensions, water pumping rate and body size in the mussel *Mytilus edulis*. *L. J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **155**: 213–237.
- Jørgensen, C.B., R.S. Larsen, and H.U. Riisgard, 1990. Effect of temperature on the mussel pump. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **64**: 89–97.
- Kang, I.J., H. Yokota, Y. Oshima, Y. Tsuruda, T. Hano, M. Maeda, N. Imada, H. Tadokoro, and T. Honjo, 2003. Effects of 4-nonylphenol on reproduction of Japanese medaka, *Oryzias latipes*. *Environ. Toxicol. Chem.*, **22**(10): 2438–2445.
- Langston, W.J. and S.K. Spence, 1995. Biological factors involved in metal concentrations observed in aquatic organisms. In: *Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic System* (ed. by Tessier A. and Turner D.R.). John Wiley & Sons, Chichester, UK, pp 407–478.
- Lee, J.S. and J.J. Park, 2007. Risk assessment of nonylphenol using sex ratio, sexual maturation, intersex and lipofuscin accumulation of the equilateral venus *Gomphina veneriformis* (Bivalvia: Veneridae). *J. Kor. Fish. Soc.*, **40**(1): 16–23.
- Lee, B.G., W.G. Wallace, and S.N. Louma, 1998. Uptake and loss kinetic of Cd, Cr and Zn in the bivalves *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: effect of size and salinity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **175**: 177–189.
- Lee, C.H. and E.Y. Chung, 2001. Determination of experimental conditions for measurement of the clearance rate of an intertidal bivalve, *Glauconome chinensis*. *Korean J. Malacology*, **17**: 95–104.
- Lee, J.S. and B.G. Lee, 2005. Relationship between clearance rates and metal uptake rates of *Corbicula fluminea*, *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: influence of water temperature and body size. *Korean J. Malacology*, **21**: 41–46.
- Lee, W.S., M.K. Choi, D.W. Hwang, I.S. Lee, and S.Y. Kim, 2012. Chemical contamination and toxicity of sediments from the Gunsan coast, Korea. *Fish. Aquat. Sci.*, **15**(3): 241–250.
- Lei, A.P., Y.S. Wong, and N.F.Y. Tam, 2002. Removal of pyrene by different microalgal species. *Water. Sci. Technol.*, **46**: 195–201.
- Li, D.H., M.S. Kim, W.J. Shim, U.H. Yim, S.H. Hong, and J.R. Oh, 2004. Distribution of nonylphenol in Gwangyang bay and the surrounding streams. *Korean J. Environ. Biol.*, **22**: 71–77.
- Lietti, E., M.G. Marin, V. Matozzo, S. Polesello, and S. Valsecchi, 2007. Uptake and elimination of 4-Nonylphenol by the clam *Tapes philippinarum*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **53**: 571–578.
- Lim, K.H., H.C. Shin, and J.S. Yang, 2005. The influence of water temperature and food concentration on the filtration rates of the Asiatic clam, *Corbicula fluminea*. *Korean J. Malacology*, **21**: 19–24.
- Matozzo, V., M. Deppieri, M. Moschino, and M.G. Marin, 2003. Evaluation of 4-nonylphenol toxicity in the clam *Tapes philippinarum*. *Environ. Res.*, **91**: 179–185.
- Møhlenberg, F. and H.U. Riisgard, 1978. Efficiency of particle retention in 13 species of suspension-feeding bivalves. *Ophelia*, **17**: 139–246.
- O'Connor, T.P., 2002. National distribution of chemical concentration in mussels and oysters in the USA. *Mar. Pollut. Bull.*, **53**: 117–143.
- Park, J.S. and J.S. Lee, 2011. Change of reproductive and histological biomarkers of *Ruditapes philippinarum* (Bivalvia: Veneridae) exposed to nonylphenol. *Korean J. Malacol.*, **27**(3): 181–190.
- Podolsky, R.D., 1994. Temperature and water viscosity: physiological versus mechanical effect on suspension feeding. *Science*, **265**: 100–103.
- Reeders, H.H. and A.B. de Vaate, 1990. Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiologia*, **200**: 437–450.
- Renner, R., 1997. European bans on surfactant trigger transatlantic



- debate. Environ. Sci. Technol., **31**(7): A316–A320.
- Riisgard, H.U., 2001. On measurement of filtration rates in bivalves—the stony road to reliable data: review and interpretation. Mar. Ecol. Prog. Ser., **211**: 275–291.
- Robinson, W.R., R.H. Peters, and J. Zimmermann, 1983. The effect of body size and temperature on metabolic rate of organisms. C. J. Zoology, **61**: 281–288.
- Servos, M.R., 1999. Review of the aquatic toxicity, estrogenic responses and bioaccumulation of alkylphenol and alkylphenol polyethoxylates. Water Qual. Res. J. Can., **34**: 123–177.
- Shin, H.C. and K.H. Lim, 2003. The influence of water temperature and salinity on the filtration rates of the sohr-t-necked clam, *Ruditapes philippinarum*. Korean J. Malacology, **19**: 1–8.
- Snyder, S.A., T.L. Keith, S.L. Pierens, E.M. Snyder, and J.P. Giesy, 2001. Bioconcentration of nonylphenol in fathead minnows (*Pimephales promelas*). Chemosphere, **44**(8): 1697–1702.
- Sprung, M., 1995. Physiological energetics of the zebra mussel *Dreissena polymorpha* in lakes. II. Food uptake and gross growth efficiency. Hydrobiologia, **304**: 133–146.
- Strohmeier, T., Ø. Strand, and P. Cranford, 2009. Clearance rates of the great scallop (*Pecten maximus*) and blue mussel (*Mytilus edulis*) at low natural seston concentrations. Mar. Biol. **156**: 1781–1795.
- Sylvester, F., J. Dorado, D. Boltovskoy, Á. Juárez, and D. Cataldo, 2005. Filtration rates of the invasive pest bivalve *Limnoperna fortunei* as a function of size and temperature. Hydrobiologia, **524**: 71–80.
- Tezuka, N., E. Ichisaki, M. Kanematsu, H. Usuki, M. Hamaguchi, and K. Iseki, 2009. Particle retention efficiency of asari clam *Ruditapes philippinarum* larvae. Aquat. Biol. **6**: 281–287.
- Vidal, M.L., A. Bassères, and J.F. Narbonne, 2002. Influence of temperature, pH, oxygenation, water-type and substrate on biomarker responses in the freshwater clam *Corbicula fluminea* (Müller). Comp. Biochem. Physiol., **132C**: 93–104.
- Wang, J.F., C.Y. Chuang, and W.X. Wang, 2005. Metal and oxygen uptake in the green mussel *Perna viridis* under different metabolic conditions. Environ. Toxicol. Chem., **24**(10): 2657–2664.
- Wang, W.X. and A.T.S. Chow, 2002. Benzo[a]pyrene absorption and exposure pathways in the green mussel *Perna viridis*. Environ. Toxicol. Chem., **21**: 451–458.
- Wang, W.X., 2001. Comparison of metal uptake rate and absorption efficiency in marine bivalves. Environ. Toxicol. Chem., **20**: 1367–1373.
- Wang, W.X., N.S. Fisher, and S.N. Louma, 1996. Kinetic determinations of trace element bioaccumulation in the mussel *Mytilus edulis*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **140**: 91–113.
- Wang, W.X. and N.S. Fisher, 1997. Modeling the influence of body size on trace element accumulation in the mussel *Mytilus edulis*. Mar. Ecol. Prog. Ser., **161**: 103–115.
- Werner, I. and J.T. Hollibaugh, 1993. *Potamocorbula amurensis*: Comparison of clearance rates and assimilation efficiencies for phytoplankton and bacterioplankton. Limnol. Oceanogr., **38**: 949–964.
- Widdow, J. 1985. Physiological procedures. In: The effects of stress and pollution on marine animals (Bayne B.L., Brown, D.A., Burns, K., Dixon, D.R., Ivaovici, A., Livingston, D.R., Lowe, D.M., Moore, M.N., Stedding, A.R.D., and Widdows, J. eds.). pp. 161–179. Praeger, New York.
- Wilson, J.G. and B. Elkaim, 1991. Tolerances to high temperature of infaunal bivalves and the effect of geographical distribution, position on the shore and season. J. Mar. Biol. Ass., **71**: 169–177.
- Ying, G.G., B. Williams, and R. Kookana, 2002. Environmental fate of alkylphenol ethoxylates - a review. Environment International, **28**: 215–226.

---

2013년 1월 18일 원고접수

2013년 5월 21일 수정본 접수

2013년 5월 22일 수정본 채택

담당편집위원: 신현출