

pH 저하가 소백옆새우 (*Gammarus sobaegensis* Uéno)에 미치는  
급, 만성 생태독성학적 특성  
- 1. 정체성 조건 -

박정호\* · 조동현 · 정근<sup>1</sup>

강원대학교 자연과학대학 생명과학부 생물학전공,  
<sup>1</sup>농업생명과학대학 자원생물환경부

Ecotoxicological Characteristics of *Gammarus sobaegensis* Uéno  
by Acute and Chronic pH Depression on Artificial Static Waters

Jung-Ho Park\*, Dong-Hyun Cho and Keun Chung<sup>1</sup>

Department of Biology and <sup>1</sup>Division of Biological Environment,  
Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

**Abstract** - This study was carried out to investigate the ecotoxicological response on *Gammarus sobaegensis* Uéno with acid stress. Mean value of LT<sub>50</sub> (lethal time 50%) under pH 3 condition as acute ecotoxicity test was observed to be 0.271 (±0.146) day. And 0.812 (±0.377) day under pH 4, respectively. Mean value of LT<sub>50</sub> under pH 3 and 5 were 6.313 (±0.828), and 9.475 (±4.881) day, respectively. Variance in chronic ecotoxicity test pH (F ratio: 11.240, P<0.0005) and times (F ratio: 2.916, P<0.0005) as single factor were revealed to be the major factor for determining LT<sub>50</sub> with acid depression. The variation of secondary gill surface with acid stress to be certain that wrinkle phenomenon. Being weak tolerance of *G. sobaegensis* against the acid stress, it shows the possibility to be examined as an aquatic toxicity test organism.

**Key words** : Acid stress, Ecotoxicity test, LT<sub>50</sub>, Gill surface, *Gammarus sobaegensis*

서 론

일반적으로 산성비라고 하는 것은 석탄, 석유 등의 화석연료가 연소할 때 황산화물(SO<sub>2</sub>), 질소산화물(NOx)이 대기 중에서 수소와 결합되는 등 복잡한 화학반응을 일으킨 후, 최종적으로 황산이온, 질산이온 등으로 변화하여 강한 산성을 나타내는 강우 현상을 말한다(Mackenzie 1991). 1987년 NAPAP (National Acid Precipitation

Assessment Program)에 의하면, 이러한 비는 원래 대기 중의 탄산가스와 반응하여 약산성을 띠며 대기오염원로부터 배출된 각종 산화물이 공기중의 물방울에 녹아 비를 더욱 산성화시키는 것으로 약 pH 5.65 이하를 나타내고 있다고 보고하고 있다(Lefohn 1988). 또한 국내에서도 이미 1995년 8월 서울지역에 pH 3.4의 강산성비가 내렸으며, 인천과 부산 등도 거의 비슷한 수준의 산성비가 강하한 적이 있다고 밝혀 생태계의 혼란이 예상된다(환경부 1996)고 한 바 있다. 이러한 산성강하물은 호수와 강 그리고 토양의 pH를 저하시키며, 육상생태계에 있어선 조류나 기타 포유류에겐 낮은 급성독성

\* Corresponding author: Jung-Ho Park, Tel. 033-250-8520,  
E-mail. ecology0@kangwon.ac.kr

을 나타내나, 수서생물에겐 직접적이고 치명적인 높은 급성독성을 가지고 있다(Freedom 1989). 대부분 청정한 산간계류는 pH가 약 6을 상회하는 곳이 많다. 그러한 수역에서의 동물상은 약 70~90개의 분류군을 유지하는 매우 풍부한 상태를 나타내며 그 양 또한 풍부하다(Rosenberg and Resh 1993). 그러나 산성화된 계류에서는 평균 pH가 약 5.4에서 5.7을 나타내는 것이 일반적이며, 종조성 또한 매우 빈약한 상태를 보여준다(Gorham and Vodopich 1992).

최근 들어 이와 같은 산성화에 따른 생태계의 생물군집 변화에 대해서 국외에서는 이미 70년대 후반부터 활발한 연구가 시행되고 있다(Hall et al. 1980; Hall and Ide 1987; Stephenson 1994; Lancaster 1996). 또한 국내에서도 유와 김(1993), 이 등(1994), 김과 조(1996), 박 등(2000)을 비롯한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 자연계류에서 서식하는 저서성 대형무척추동물들을 대상으로 한 산성화 영향연구는 매우 미미한 것이 사실이며, 또한 산성화가 진행되는 동안의 수생물 내성변화에 관한 연구는 거의 이루어진 바 없다.

이에 본 연구는 인공적인 산성화 조건하에서 발생할 수 있는 소백옆새우(*G. sobaegensis*)의 생존시간 변화와 아가미 표면조직의 변이 등을 1차로 정체성실험을 중심으로 밝혀 봄으로써, 추후 각종 수환경 변화에 따른 수생물군집의 생물학적 경보시스템에 대한 기초자료로 제공되고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 시험생물 및 연구기간

본 연구에 사용된 소백옆새우(*Gammarus sobaegensis* Uéno)는 1996년 3월 15일 강원도 춘천시 오월리 1차 계류(37° 57'N, 127° 37'E) (국립지리원, 1995a, b)에서 Surber형 net (mesh size : 500 $\mu$ m) 및 Deep net (mesh size : 500 $\mu$ m)을 사용하여 채집하였다. 채집 후 이동시 발생하는 스트레스를 최소화하기 위하여, 미리 준비한 Ice Box에서 수온을 15( $\pm$ 3) $^{\circ}$ C를 유지시키며 기포발생기를 준비하여 충분한 산소를 공급하였다.

실험실 이동 후 96시간동안 채집 중 그리고 이동 중에 받은 여러 가지 스트레스를 완화시키기 위하여, 채집된 다른 종류의 저서생물들과 각종 낙엽으로부터 분리시키지 않고 그대로 저온배양기(HB 603-CS)에 정착시키는 1차 순화과정을 실시하였다. 그 후 수작업을 통해 소백옆새우(*G. sobaegensis*)를 다른 채집물로부터 조심스럽게 1차 분류를 한 후, 수온을 15( $\pm$ 0.5) $^{\circ}$ C로 유지시

킨 저온배양기내에서 48시간동안 다시 2차 순화시켰다. 그리고 각 개체에 대한 자극을 최대한 줄이기 위하여 플라스틱 손가락 혹은 스포이드로 건강한 개체들을 직접 선별 한 후, 여러 종류의 하상(큰돌:작은돌:모래 = 1:2:7)이 준비된 원형 순화조(지름 60 cm, 높이 20 cm, PolyPropylene)에 적응시키는 마지막 3차 순화과정을 실시하였다. 이러한 과정을 거치고 난 후, 순화조에서 성숙한 어미 소백옆새우(*G. sobaegensis*)로부터 얻어진 2 mm 이하의 유생을 배양조(지름 60 cm, 높이 15 cm, 작은돌:모래 = 1:1) 내에서 최소 2개월에서 최대 9개월 이상 배양시킨 종을 본 실험에 사용하였다. 배양하는 동안 먹이는 48시간동안 용탈시킨 갈참나무(*Quercus aliena*) 잎을 사용하였으며, 순화조에 사용되는 원수는 본 종이 채집된 강원도 오월리 1차계류에서 지속적으로 공급을 받았다.

연구기간은 1997년 8월부터 1998년 10월까지 급성 및 만성 생태독성실험을 각 2회에 걸쳐 수행하였다.

### 2. 연구방법

일반적으로 수서생물을 대상으로 하는 생태독성실험은 정체성 독성실험과 유수성 독성실험으로 구분되며 주로 반수치사시간, 생존마리수 혹은 치사농도 등으로 그 독성의 정도와 영향범위를 측정할 수 있다(Gary and Petrocelli 1985; Pilgrim and Burt 1993). 본 연구에서는 우선 정체성 조건 하에서 각 pH 수준에 따른 급, 만성 생태독성을 알아보았다.

#### 1) pH 수준별 반수치사시간(LT<sub>50</sub> : Lethal Time 50%)

배양조로부터 얻어진 건강한 옆새우를 크기별(소형: 5 mm 이하, 중형: 6~10 mm, 대형: 11 mm 이상)로 각각 5 개체씩 총 15개체를 취하여 원형용기(지름 30 cm, 높이 15 cm, PolyPropylene)에 준비하였다. 그리고 본 실험에 사용될 pH 용액은 직접 채수해온 오월리 원수를 HNO<sub>3</sub>을 사용하여 각 수준별(pH 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5)로 준비하였다. 대조군은 오월리 1차 계류 원수를 직접 사용하였으며, 연구기간내에 pH 6.5( $\pm$ 0.5)가 유지되었다. 배양조의 광주기는 소백옆새우(*G. sobaegensis*)의 서식 조건을 고려하여 명조건(125 Lux $\pm$ 10) 13시간 그리고 암조건 11시간으로 조절하였다. 또한 먹이로는 갈참나무(*Quercus aliena*) 낙엽을 넣어주었다.

급성생태독성실험은 미리 준비된 각 수준의 pH 용액에, 적응시간 없이 바로 옆새우를 투여하여 60시간(2.5 일) 동안 3시간 간격으로 측정 및 관찰을 실시하였다. 그리고 만성생태독성실험은 48시간 간격으로 각각의 pH 조건들로 조절하였으며, 총 384시간(16일)동안 3시간 간

격으로 관찰 및 측정을 실시하였다. 각 처리구에는 지속적인 산성효과를 주기 위하여 Pilgrim과 Burt (1993)의 방법에 따라 pH 1.0으로 조절된 HNO<sub>3</sub>를 한 시간 간격으로 미량 투여하여 pH 보정을 하였다. 또한 각 조건시 먹이 투입여부에 따른 영향도 동시에 알아보았다.

결과처리는 산변화를 유발시켰을 때 사망시간 및 사망 개체수를 각각 측정 후 반수치사시간(LT<sub>50</sub>)을 알아보았다. 각 처리구와 옆새우와의 상관관계를 알기 위하여, 통계분석프로그램인 SYSTAT® version 9.01 (Wilkinson 1999)를 이용 일원분산분석 (One way analysis of variance: ANOVA) 및 다원분산분석 (Multiple analysis of variance: MANOVA)을 통해 그 특성을 분석해 보았다.

2) 아가미 표면 형태변화

급격한 산성스트레스가 수서생물의 호흡기관에 직간접적인 영향을 미친다 (Vouri 1996)는 연구를 바탕으로, 각 pH 수준별에 따라 사망이 확인된 소백옆새우 (*Gammarus sobaegensis* Uéno)의 제2아가미를 분리한 후, 주사전자현미경 (HITACHI® S-2500)을 사용하여 아가미 표면의 형태 변이 여부를 관찰하였다.

결과 및 고찰

1. 급성 독성에 따른 소백옆새우 (*G. sobaegensis*)의 사망 개체수 변화

전반적으로 먹이를 투입하지 않은 급성독성실험에서는 pH 4.5 이하 대역에서 21시간 이전에 많은 개체가 사멸하는 것으로 나타났다 (Fig. 1). 또한 대부분의 소백옆새우 (*G. sobaegensis*)들은 pH 3.0과 pH 3.5 대역에서 15시간 이내에 사망하는 것으로 확인되었으며, pH 4.0과 pH 4.5에서는 33시간 이내에 그리고 pH 5.0 이상의 대역에서는 거의 사멸하지 않는 것으로 확인되었다.

대형개체의 경우, pH 3.0과 pH 3.5 대역에서 초기 투입 후 12시간 이전에 높은 사망률을 보여주고 있었으며, pH 4.0과 4.5 대역에서는 간헐적으로 한 마리 정도씩 사망하는 것으로 보아 pH 3.0~3.5 대역보다는 비교적 내성을 보이는 것으로 확인되었다. 중형개체의 경우에는 pH 3.0과 pH 3.5 대역에서 대부분 9시간 이전에 사망하는 것으로 나타났으며, pH 4.0~4.5 대역에서는 실험이 완료되는 60시간까지 간혹 한 마리씩 사망하는 모습을 보여주어 대형개체보다 더 내성이 약하다는 것을 보여주고 있었다. 또한 소형개체들은 대부분 pH 3.0~3.5 대역에서 12시간 이전에 높은 사망률을 나타내었다. 특히, pH 3.0~4.5의 대역에서 12시간 이전 초기사망유형은 사망이 거의 없다가 갑자기 사망률이 증가하는 현상을

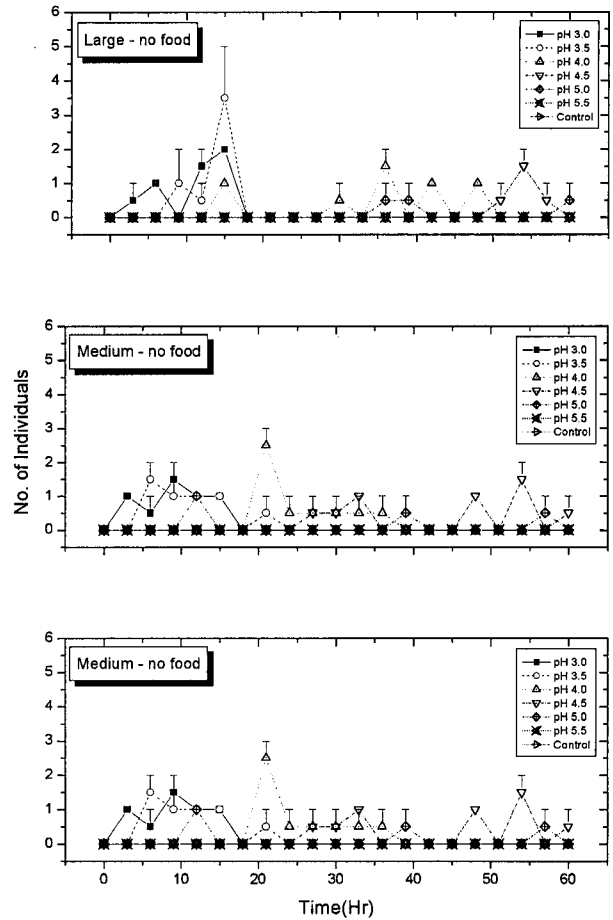


Fig. 1. Acute ecotoxicity test of *G. sobaegensis* by acid stress in food absent condition (Error bar: SE).

보여주었다.

그러나 먹이인 갈참나무 (*Quercus aliena*)낙엽을 투입한 경우에는 매우 특이한 현상이 나타났다. 즉 먹이를 투입하지 않은 경우보다 오히려 초기사망시간(실험 9시간 이전)이 매우 짧은 것으로 나타났다 (Fig. 2). 이는 먹이가 산재한 실험조건이 오히려 회피능력에 방해를 일으켜 운동력 증가에 따른 산소소비변화가 아가미와 같은 호흡기관에 치명적으로 작용한 것으로 생각된다. 이러한 결과는 급성 pH 저하, 혹은 알루미늄 이온 등의 아가미 흡착 등과 같은 독성영향이 이온조절 기관의 손상에 따른 정상 삼투조절기작의 손상을 일으켜 많은 종류의 단각류들의 생활사 전 단계에 걸쳐 전반적으로 영향을 끼친다는 연구 (Vouri 1996)와도 일치한다. 그 외 각 크기별, pH 대역별 사망률은 먹이를 투입한 경우의 급성 독성실험과 거의 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

그러나 다원분산분석 (MANOVA) 결과 시간에 따른

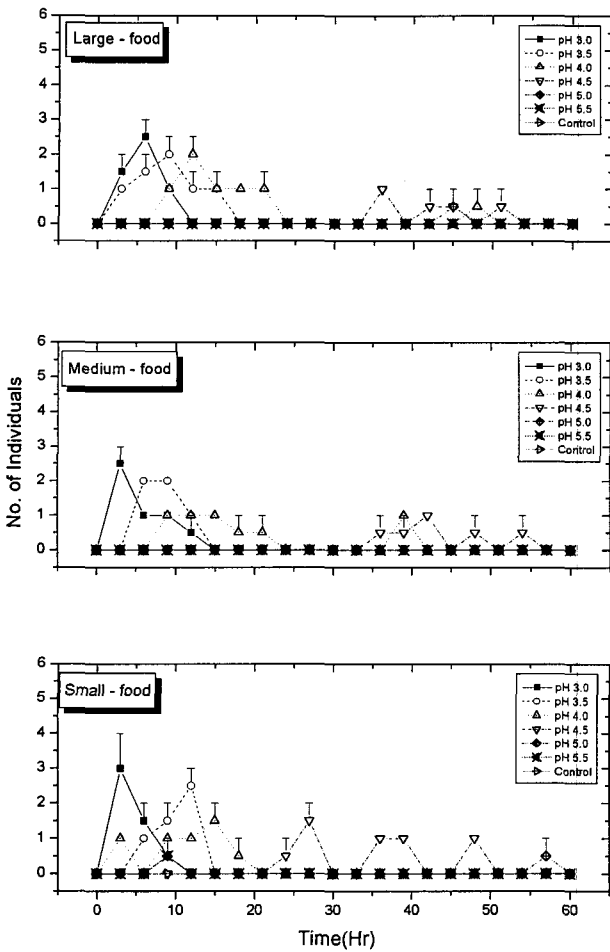


Fig. 2. The distribution of tolerance range in acute ecotoxicity test by acid stress to *G. sobaegensis* (Food present condition).

사망률과 먹이의 유무는 거의 관계가 없는 것( $F: 1.110, P < 0.29$ )으로 나타났다(Table 1). 이는 갑작스러운 독성으로 인한 초기사망은 비록 먹이의 투입유무와 관계가 있다 할지라도 전반적인 진행시간에 따른 사망률의 차이가 매우 작기 때문이다. 또한 사망수에 매우 큰 영향을 미친 것으로 나타난 요인은 pH( $F: 51.287, P < 0.0005$ )와 경과시간( $F: 23.247, P < 0.0005$ )으로서의 단독 요인이다. 그리고 먹이투입유무와 시간( $F: 8.836, P < 0.0005$ ), pH와 경과시간( $F: 14.037, P < 0.0005$ ), 크기와 경과시간( $F: 2.870, P < 0.0005$ ), 먹이유무와 pH와 경과시간( $F: 6.191, P < 0.0005$ ), 먹이유무와 크기와 경과시간( $F: 2.427, P < 0.0005$ ), pH와 크기와 경과시간( $F: 2.816, P < 0.0005$ ), 그리고 먹이유무와 pH와 크기와 경과시간( $F: 1.550, P < 0.0005$ ) 등의 복합요인도 매우 큰 영향을 끼친 것으로 나타났다. 이는 각 처리군의 차이를 99.95% 유의수준 하에서 보았을 때 고도로 유의성이 있다는 것을 의미한다.

결국 소백열새우(*Gammarus sobaegensis* Uéno)를 대상으로 인위적인 pH 저하에 대한 정체성 급성 독성실험을 수행한 결과, 대부분의 개체는 먹이를 투여하지 않은 조건과 먹이를 투여한 조건 모두 투여 후 21시간 이내에 크기에 관계없이 사망하는 것으로 확인되었다. 즉 내성이 약한 중소형개체는 반응 후에는 15시간도 안되어 대부분 사망하였으며, 대형개체는 일부만 살아남았고, 사망률 또한 시간이 경과한 후 급격한 감소를 보여주었다. 이러한 결과는 자연계류에 산성화조건이 발생할 경우 대부분의 개체들은 사망하거나 하류역으로 회피하는 경향을 보인다는 박 등(2000)의 연구결과와도 일치한다.

Table 1. Multiple analysis of variance for the effect of food, size, pH and times to death rate of the *G. sobaegensis* by pH depression

Source	Sum-of-squares	df	Mean-square	F-ratio	P
Food	0.069	1	0.069	1.110	0.29
pH	19.015	6	3.169	51.287	0.00 <sup>1</sup>
Size	0.144	2	0.072	1.165	0.31
Times	28.729	20	1.436	23.247	0.00
Food* pH	0.189	6	0.032	0.511	0.80
Food* Size	0.049	2	0.024	0.394	0.67
Food* Time	10.920	20	0.546	8.836	0.00
pH* Size	0.499	12	0.042	0.673	0.78
pH* Time	104.080	120	0.867	14.037	0.00
Size* Time	7.094	40	0.177	2.870	0.00
Food* pH* Size	0.134	12	0.011	0.180	0.99
Food* pH* Time	45.906	120	0.383	6.191	0.00
Food* Size* Time	5.999	40	0.150	2.427	0.00
pH* Size* Time	41.763	240	0.174	2.816	0.00
Food* pH* Size* Time	22.985	240	0.096	1.550	0.00
Error	54.500	882	0.062		

<sup>1</sup>The P value printed here is 0.00, so it is less than 0.0005

**Table 2.** The value of  $LT_{50}$  for *G. sobaegensis* by acute toxicity test

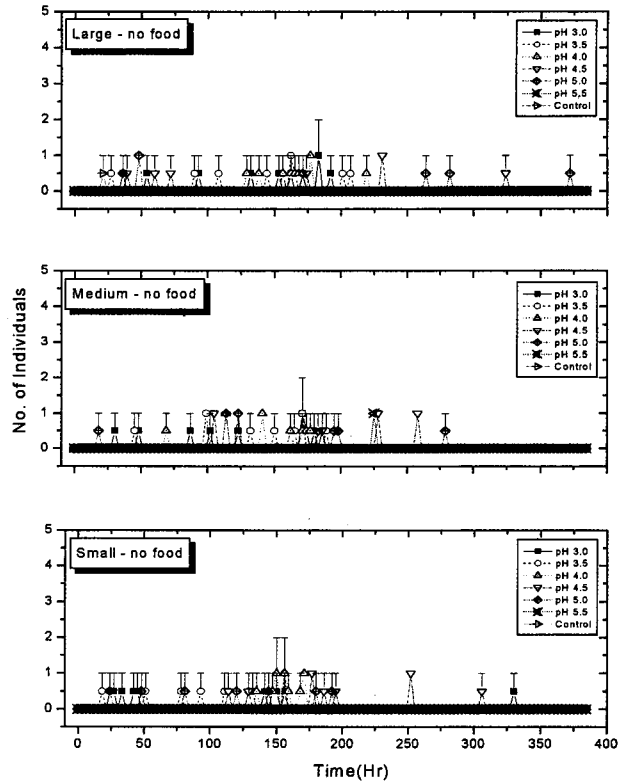
pH level	Size	Food	
		Absent	Present
pH 3.0	Large	0.500	0.250
	Medium	0.375	0.125
	Small	0.250	0.125
pH 3.5	Large	0.625	0.375
	Medium	0.500	0.250
	Small	0.500	0.375
pH 4.0	Large	1.500	0.500
	Medium	0.875	0.625
	Small	0.875	0.500
pH 4.5	Large	-*	-
	Medium	2.000	-
	Small	1.250	1.500
pH 5.0	Large	-	-
	Medium	-	-
	Small	-	-
pH 5.5	Large	-	-
	Medium	-	-
	Small	-	-
Control	Large	-	-
	Medium	-	-
	Small	-	-

\*: Not detected

각각의 산성스트레스 조건에 의해 확인된 반수치사시간( $LT_{50}$ )을 알아본 결과, 본 급성독성실험에서는 개체의 크기 또는 먹이의 유무 그리고 주변 환경에 대한 적응능력에 관계없이 pH 3.0의 대역에서 반수치사시간이 평균  $0.271(\pm 0.146)$  day인 모습을 나타내고 있었다(Table 2). 또한 pH 4.0의 대역에서는 평균  $0.812(\pm 0.377)$  day으로 pH 3.0~3.5의 대역보다 다소 늘어난 모습을 보여주었다. pH 5.0 이상의 대역에서는 실험중의 반수이상 살아남아 반수치사시간을 확인할 수 없었다. 이같은 결과는 결국 pH 5.0 이상의 대역에서 소백옆새우(*G. sobaegensis*)는 산성스트레스에 대한 영향을 거의 받지 않았음을 시사한다.

**2. 만성독성에 따른 소백옆새우 (*G. sobaegensis*)의 사망개체수 변화**

먹이를 투여하지 않은 만성독성실험에서는 전반적으로 192시간(8일째)이 경과한 후, 개체의 크기와 상관없이 pH 3.0 대역과 pH 4.0 대역에서 소백옆새우(*Gammarus sobaegensis* Uéno) 대부분이 사망하였다. 또한 pH 4.5 대역에서의 소백옆새우(*G. sobaegensis*) 생존기간은 264시간(약 11일)으로서 pH 3.0 대역 보다 긴 것으로



**Fig. 3.** Chronic ecotoxicity test of by acid stress (food absent).

나타났다. 그리고 대형개체 중 pH 5.0 이상 대역에서 36 시간 이전에 일부 개체가 사망을 한 경우가 나타났다. 이는 본 개체들이 산도에 의한 스트레스를 받았다기 보다는 배양조에서 적응이 덜 되었거나 혹은 노화가 상당히 진행된 개체일 가능성이 많은 것으로 보여진다. 결국 본 만성독성실험에서는 대형개체보다 소형개체가 산성화에 따른 스트레스를 많이 받아 실험 초기에 빠르게 사망하는 것으로 확인되었다.

먹이를 넣어준 실험은 먹이가 없는 실험과 다소 다른 양상을 보여주었다(Fig. 4). 전반적으로 대형과 중형개체의 경우 초기사망시간이 먹이를 넣어주지 않은 경우에 비해 현저하게 길어졌던 것이다. 특히 각 실험단계에서 pH 3.0과 pH 3.5 대역을 제외하곤 대부분 먹이로 투입한 갈참나무(*Quercus aliena*) 낙엽을 섭식한 사실이 확인되었다. 이러한 결과로서 먹이를 넣어주지 않은 실험에 비해 낙엽자체가 숨을 수 있는 서식처로 인식되어 스트레스가 감소되었거나(Griffith and Perry 1994), 혹은 먹이를 먹음으로 인하여 영양단계가 활성화되어 생존기간이 늘어난 것(Wilson 1996)은 아닌가 생각된다.

또한 192시간(8일 이전)에 대부분의 개체들이 사멸한다는 것이 먹이를 투여하지 않은 상황과 동일하다는 것

이었고, 차이점은 pH 4.0 이상 대역에서 생존기일이 먹이가 없던 때에 비해 매우 늘어난 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 pH 3.0 대역에서는 모든 개체가 200시간 이전에 사망하는 것으로 나타났으며 특히 대형이나 중형보다 소형개체가 약 50시간 이상 빨리 사망하는 것으로 확인되었다. 특히 pH 4.0 대역에서는 대형개체보다 중형개체가 많이 사망한 것으로 확인되었다. 이는 급성 독성실험과 마찬가지로 중형개체가 대형이나 소형개체에 비해 산도에 대한 내성의 변이 정도가 큰 것으로 보인다. 이는 아마도 중형개체 시기가 탈피를 가장 활발히 하는 시기라서 pH 저하에 따른 스트레스를 많이 받는 것으로 여겨진다(박 등 2000). 또한 pH 5.0 이상 대역에서는 개체의 크기에 상관없이, 시간의 흐름에 따른 사망률이 거의 변화 없는 것으로 확인되었다.

일원분산분석 결과, 만성독성에 있어서 소백열새우(*G. sobaegensis*)의 생존에 가장 많은 영향을 끼친 것은 역시 pH 단독요인(F: 11.240, P<0.0005)과 경과시간(F: 2.916, P<0.0005)으로 확인되었다(Table 3). 그러나 기대했던 것과는 다르게 먹이의 투입여부(F: 0.200, P<0.66)는 소백열새우(*G. sobaegensis*)의 사망에 영향을 약하게 끼친 것으로 나타났다. 이러한 결과는 비교적 대형

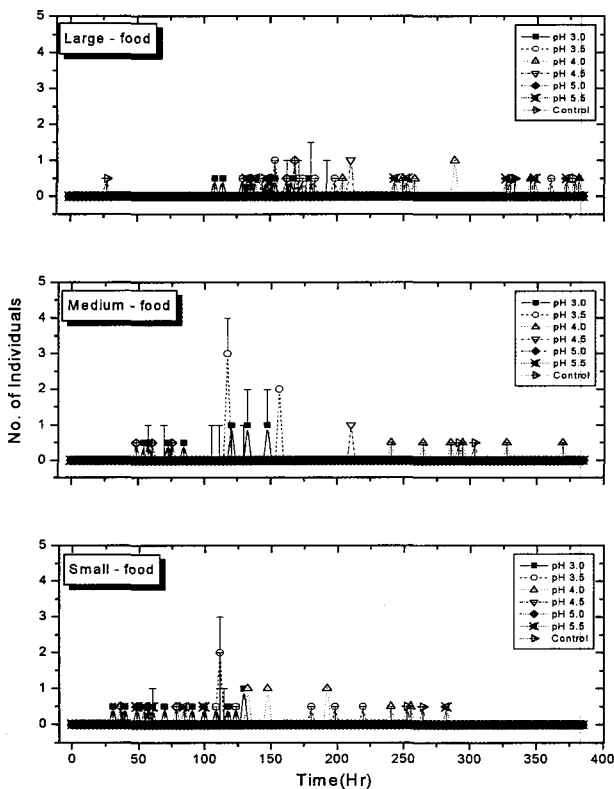
개체의 경우에는 먹이의 투입 유무에 따라 사망률에 있어 차이가 나타나지만, 다른 크기의 개체들에 있어선 그다지 큰 영향을 끼치지 못했음을 의미하고 있다.

만성독성에 있어서 소백열새우(*G. sobaegensis*)의 LT<sub>50</sub>은 pH 3.0일 때는 약 4.875~7.125 day로 평균 6.313(±0.828) day 인 것으로 확인되었다. pH가 4.0 일 때는 약 4.625~7.750day로 평균 6.271(±1.298) day를 보여

**Table 3.** One way analysis of variance for the effect of food, pH, size and times to death rate of the *G. sobaegensis* by pH depression in chronic ecotoxicity test

Source	Sum-of-squares	df	Mean-square	F-ratio	P
Food	0.006	1	0.006	0.200	0.66
Error	320.551	10834	0.030		
pH	1.984	6	0.331	11.240	0.001
Error	318.573	10.829	0.029		
Size	0.002	2	0.001	0.041	0.96
Error	320.554	10833	0.030		
Time	11.128	132	0.084	2.916	0.00
Error	309.429	10703	0.029		

<sup>1</sup>The P value printed here is 0.00, so it is less than 0.0005



**Fig. 4.** The distribution of tolerance range in chronic ecotoxicity test by acid stress (food condition).

**Table 4.** The value of LT<sub>50</sub> for *G. sobaegensis* by chronic ecotoxicity test

pH level	Size	Food	
		Absent	Present
pH 3.0	Large	7.125	6.375
	Medium	7.125	6.125
	Small	6.250	4.875
pH 3.5	Large	7.750	7.125
	Medium	7.125	4.375
	Small	6.500	3.250
pH 4.0	Large	7.500	6.375
	Medium	7.750	4.875
	Small	6.500	4.625
pH 4.5	Large	—*	10.125
	Medium	10.750	4.875
	Small	10.500	4.625
pH 5.0	Large	1.125	13.875
	Medium	5.125	15.375
	Small	5.000	8.000
pH 5.5	Large	—	—
	Medium	—	—
	Small	—	—
Control	Large	—	—
	Medium	—	—
	Small	—	—

\*: Not detected

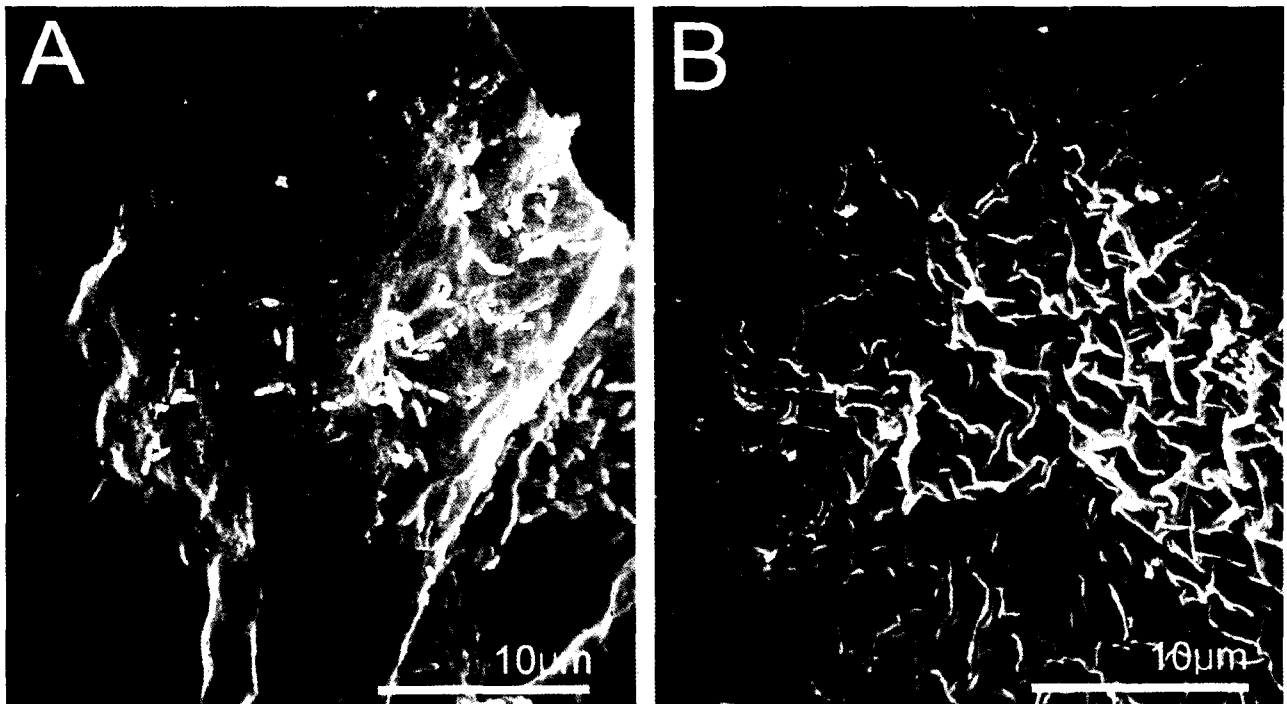


Fig. 5. Changes in gill surface following damage by exposure to acid stress in *Gammarus sobaegensis* Uéno (A-control: Normal, B-pH 3.0: Abnormal).

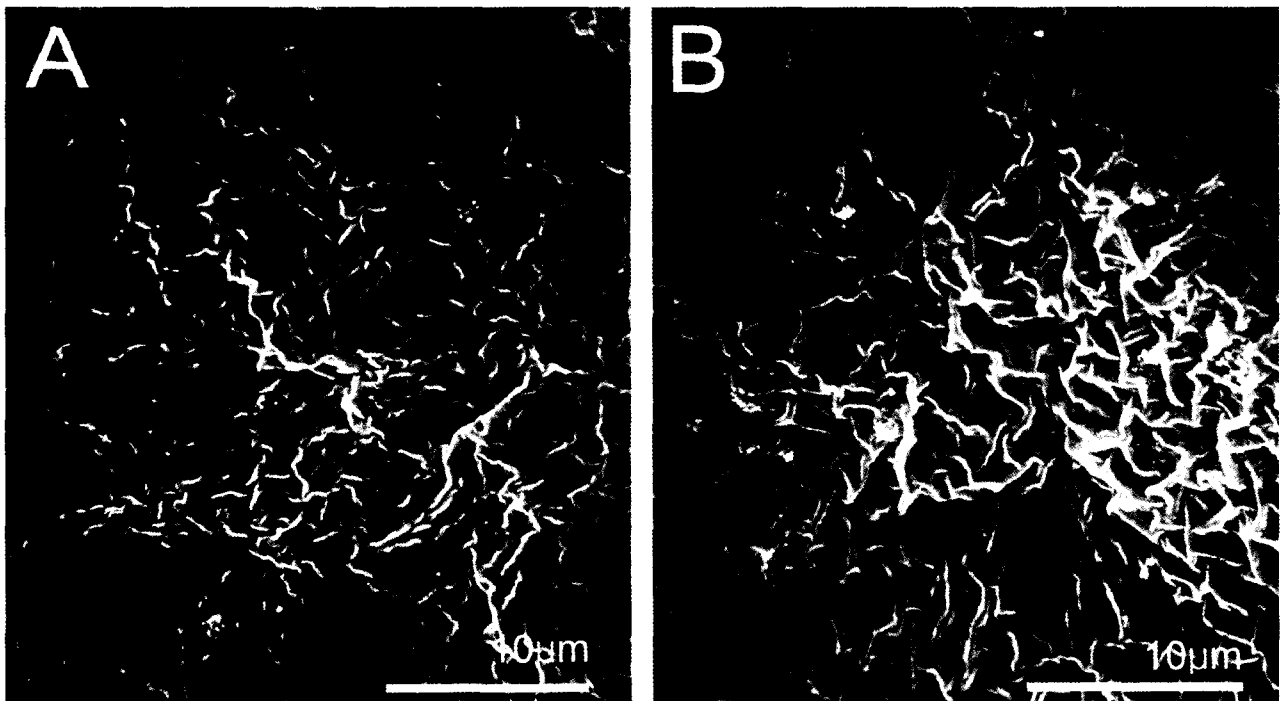


Fig. 6. The comparative of gill surface by acid stress in pH 3.0 (A: Chronic, B: Acute).

주어 결국 pH 3.0 대역과 pH 4.0 대역에서의 반수치사시간이 거의 비슷한 것으로 확인되었다(Table 4). 또한 pH

5.0일 때는 약 1.125~15.375 day의 매우 오랜 적응 기간을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 pH 5.0의 경우 최

소 1.125 day가 확인되었던 것은 대형개체 일부가 갑작스러운 사망을 나타내어 나온 수치로써 이것을 제외하면 약 5.000~15.375 day로 평균 9.475 ( $\pm 4.881$ ) day의 반수치사시간을 갖는 것으로 여겨진다.

### 3. 아가미 표면조직 변이

산성스트레스에 의한 조직의 이상유무를 확인해 보기 위하여 주사전자 현미경으로 소백옆새우(*Gammarus sobaegensis* Uéno)의 제2아가미 표면 조직을 관찰해 본 결과, 극심한 산도에 대한 아가미 표면의 이상현상이 확인되었다. Fig. 5의 사진 A는 정상적인 수환경에서 성장한 소백옆새우(*G. sobaegensis*)의 아가미 표면구조로서 비교적 매끄러운 겉표면을 보여주고 있으며, 사진 B는 산성스트레스에 의하여 조직이 쪼그라드는 비정상적인 주름(Wrinkle)현상을 보이고 있다.

일반적으로 수생물에게 미치는 각종 오염물에 대한 손상여부는 표피 혹은 아가미 조직 등과 같은 1차적으로 수체와 접촉하는 부분으로 확인할 수 있다(Vouri 1996). 결국 본 연구에서 확인된 아가미 표면의 주름현상은 산에 대한 직접적인 화학 반응으로써 아가미 조직이 손상되어 모양이 변형된 것(Taylor et al. 1996)으로 생각된다. 또한 만성독성과 급성독성에서 확인된 소백옆새우(*G. sobaegensis*)의 아가미 표면 변형의 가장 큰 차이점은, 만성독성에 비해 급성독성에서의 자극이 아가미 조직에 보다 더 치밀하게 작용된 것으로 보인다(Fig. 6). 즉 급성독성(B)에서의 주름의 모양이 만성독성(A)과 비교하여 볼 때, 보다 명확하고 세밀하게 접혀진 것을 확인할 수 있었다.

결국, 산성스트레스는 소백옆새우(*G. sobaegensis*)에 있어서 급성 뿐만 아니라 만성적인 효과에서도 최종적으로는 매우 치명적으로 작용한다는 사실을 알 수 있었다. 또한 이러한 산성스트레스를 받았던 옆새우들을 자연조건에서 서식시켰을 때 회복상태 정도를 알기 위해선 추후 지속적인 연구가 보다 더 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 적 요

인위적인 산성스트레스가 담수산 소백옆새우(*Gammarus sobaegensis* Uéno)에 미치는 영향을 정체성 수조 건 하에서 급, 만성 생태독성실험을 통해 알아보았다. 급성독성 실험 시 pH 3 대역에서의 반수치사시간(LT<sub>50</sub>)은 평균 0.271 ( $\pm 0.146$ ) day로 개체의 크기 또는 먹이의 유무 그리고 주변 환경에 대한 적응능력에 관계없이 일정한 모습을 나타내고 있었다. pH 4.0 대역에서의 LT<sub>50</sub>은

0.812 ( $\pm 0.377$ ) day로 연장되는 것이 확인되었다. 만성 독성실험의 경우 본 종의 반수치사시간은 pH 3.0일 때 약 6~7 day로 평균 6.313 ( $\pm 0.828$ ) day 인 것으로 나타났으며, pH 5.0일 때는 평균 9.475 ( $\pm 4.881$ ) day의 오랜 적응 기간을 갖는 것으로 확인되었다. 이러한 차이는 먹이의 공급유무에 따라 변동이 있다는 것을 알 수 있었고, 또한 주변 환경에 적응이 잘 된 개체일수록 오랜 기간동안 생존한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 급, 만성 pH 스트레스가 가해진 소백옆새우(*G. sobaegensis*)의 제2아가미 표면조직에서 심한 주름현상을 확인할 수 있어, 결국 산성스트레스는 소백옆새우(*G. sobaegensis*)에 있어서 급성 뿐만 아니라 만성적인 영향에서도 최종적으로는 매우 치명적으로 작용한다는 사실을 알 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진연구인력 연구장려금(9702061) 지원에 의해 수행되었다. 귀 기관의 연구비 지원에 사의를 표합니다. 또한 전 실험기간 동안 각종 분석을 도와 준 강원대학교 생물학과 이찬섭, 엄훈식 군과 정경희, 김창숙양에게 진심으로 감사사를 드립니다.

## 인 용 문 헌

- 국립지리원. 1995. a. 1: 25000 지형도 No. 223-4, 도엽번호 NJ 52-9-07-2 춘천. 국립지리원.
- 국립지리원. 1995. b. 1: 50000 지형도 No. 223, 도엽번호 NJ 52-9-07 춘천(Ch'unch'ön). 국립지리원.
- 김진경, 조도순. 1996. 인공산성비가 돌피와 바랭이의 성장과 경쟁에 미치는 효과. 한국생태학회지 19(1):71-80.
- 박정호, 조동현, 정 근. 2000. 인공수로에서 산성화 영향에 따른 소백옆새우(*Gammarus sobaegensis*)의 생태독성학적 연구-표류행동을 중심으로-. 한국환경생물학회지 18(1): 153-161.
- 유태철, 김준호. 1993. 인공산성 빗물로 인한 잎으로부터의 양이온 세탈. 한국생태학회지 16(4):409-416.
- 환경부. 1996. 95년 7대도시 산성우 현황. 환경부. pp. 1-89.
- Freedom B. 1989. Environmental Ecology. pp. 81-123.
- Gary MR and SR Petrocelli. 1985. Fundamental of Aquatic Toxicology: Methods and Application. pp. 96-108.
- Griffith MB and SA Perry. 1994. Secondary production of macroinvertebrate shredders in headwater streams with different baseflow alkalinity. North America Benthological Society. 13:23-45
- Gorham CT and DS Vodopich. 1992. Effects of acidic pH on predation rates and survivorship of damselfly nymphs. Hydrobiologia. 242(1):51-62.
- Hall RJ, GE Likens, SB Fiance and GR Hendrey. 1980. Ex-



- perimental acidification of a stream in the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire. *Ecology*. 61(4): 976-989.
- Hall RJ and FP Ide. 1987. Evidence of acidification effects on stream insect communities in central Ontario between 1937 and 1985. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 44:1652-1657.
- Lancaster J. 1996. Monitoring temporal changes in the biology of acid water. *Freshwater Biology*. 36:179-201.
- Lefohn AS and SV Krupa. 1988. Conference Overview: Acidic Precipitation, A Technical Amplification of NAPAP's Findings, Proceedings of an APCA International Conference. In *Introduction to Environmental Engineering 2nd Edition*. Chemical Engineering Series (Davis ML and DA Cornwell eds.). McGraw-Hill Inc. pp. 437-439.
- Mackenzie LD and DA Cornwell. 1991. 2nd ed. *Introduction to environmental engineering*. pp. 437-439.
- Pilgrim W and DB Michael Burt. 1993. Effect of acute pH depression on the survival of the freshwater amphipod *Hyalella azteca* at variable temperatures. *Hydrobiologia*. 254:91-98.
- Rosenberg DM and VH Resh. 1993. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*, Chapman & Hall. pp. 1-488.
- Stephenson M. 1994. Effects of Experimental and Cultural Lake Acidification on Littoral Benthic Macroinvertebrate Assemblages. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51:1147-1161.
- Taylor EW, MW Beaumont, PJ Butler, J Mair and MSI Mujallid. 1996. Lethal and sub-lethal effects of copper upon fish: a role for ammonia toxicity. In *Toxicology of Aquatic Pollution* (Taylor EW ed.). Cambridge University Press. UK. pp. 143-168.
- Vouri KM. 1996. Acid induced acute toxicity of aluminium to three species of filter feeding caddis larvae (Trichoptera, Arctopsychidae and Hydropsychidae). *Freshwater Biology* 35:179-188.
- Wilson RW. 1996. Physiological and metabolic costs of acclimation to chronic sub-lethal acid and aluminium exposure in rainbow trout. In *Toxicology of Aquatic Pollution* (Taylor EW eds.). Cambridge University Press. UK. pp. 143-168.
- Wilkinson L. 1999. SYSTAT: New statistics, version 9.01, Chicago, SPSS Inc. pp. 365-485.

(Received 5 November 2000, accepted 3 December 2000)