

# 참전복, *Haliotis discus hannai* 치패의 생존과 산소소비에 미치는 phenol의 독성 영향

김 흥 윤

국립수산진흥원 여천수산종묘배양장

## Toxic Effects of Phenol on Survival and Oxygen Consumption of the Abalone Juvenile, *Haliotis discus hannai*

Heung-Yun Kim

Yochun Fisheries Hatchery, National Fisheries Research and Development Institute, Chunnam 556-905, Korea

This study was carried out to estimate toxic effects of phenol on survival and metabolism of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai*. The experiment was conducted by renewal bioassay procedure with different salinities at 20°C.

The LC<sub>50</sub> of the juvenile exposed to phenol in the range of 0.5 and 100 mg/l was 34.3~6.5 mg/l at 24‰ and 52.2~9.3 mg/l at 32‰ salinity with exposure time from 24 hours to 96 hours. LT<sub>50</sub> was remarkably reduced with increase of phenol concentration and decrease of salinity. Lethal toxicity of phenol was higher at low salinity than at high salinity. Therefore, salinity is likely to be one of factor to increase phenol toxicity.

The oxygen consumption of the juvenile was reduced with increase of phenol concentration and with decrease of salinity. In spite of phenol toxicity, the oxygen consumption of the juvenile exposed to phenol of low concentration was high and similar as compared with that of control group. Survival rates of the abalone kept in phenol-free sea water after exposure to phenol concentration of 5, 10 and 20 mg/l for 96 hours were reduced with decrease of salinity. Durations required to recover the normal metabolic rate of the juvenile, which was exposed to phenol concentration of 5, 10 and 20 mg/l for 96 hours, were made longer with increasing phenol concentration. In the case of the juvenile exposed to sublethal concentration of phenol for 15 days, it were elongated as compared with that of the abalone exposed to phenol concentration caused acute toxicity.

The result of this experiment indicated that relatively low concentration of phenol can impact on the abalone juvenile in marine ecosystem.

**Key words :** *Haliotis discus hannai*, phenol toxicity, salinity, survival, oxygen consumption, recovery

### 서 론

해양의 유류오염은 선박사고와 선저오수의 배수 (bilge pumping), 정유공장과 유관 산업체 등에서 배출하는 폐수로 인하여 최근 20년간 연안오염의 주요한 형태로 등장하였으며, 특히 선박사고로 인한 유류오염이 해양생태계에 미치는 영향은 매우 크다 (Swannell et al., 1996). 해양환경에 노출된 유류는 몇 단계 변화과정을 거치는데, 우선 저비등점의 방향족 화합물들은 증발되고, 계속해서 유류의 수용성 분획 (WSF, water soluble fraction)들이 해수에 녹아 들게 된다. 수용성 분획은 각종 해양생물에 독성을 미치며, 세균에 의해 분해될 때는 용존산소를 소모하여 생물의 생존과 대사에 악영향을 미친다 (Ahearn, 1974; Gerlach, 1981).

수서생물에 미치는 유류의 영향에 관한 초기 연구는 주로 WSF의 저해성을 중심으로 많이 연구되었다 (Ahn and Chin, 1986; Anderson et al., 1974; Laughlin and Linden, 1983; Lee, 1978; Lee et al., 1975; Lee et al., 1977).

이러한 연구는 유류오염이 해양생물에 미치는 영향을 이해하는 데에 많은 기여를 하였지만, 원유는 여러가지 성분으로 이루어진 복합물이기 때문에 원유에 함유되어 있는 특정 성분이 생물에 미치는 독성 영향을 파악하기는 어렵다. 따라서 최근의 연구는 원유내 방향족 탄화수소 화합물 (aromatic hydrocarbons)이 수서생물의 생존과 생식 및 대사에 미치는 독성 영향을 밝히고 있다 (Abernethy et al., 1986; Buttino, 1994; DeGraeve et al., 1982; Smith and Hargreaves, 1984). 원유 성분중에서 페놀은 다른 탄화수소 화합물보다 용해성이 특히 높아 용존성분으로 쉽게 용출됨으로 수서생물의 중요한 독성물질로 작용하고, 페놀에 노출된 어류는 아가미에 염증, 괴사 및 울혈 등을 일으켜 결국에는 질식사하는 것으로 알려져 있다 (Vischnevetsky, 1962).

페놀의 독성 연구는 주로 어류와 갑각류를 위주로 급성독성 (Angus, 1983; Millemann et al., 1984; Phipps et al., 1981)과 급성독성에 미치는 수온의 영향 (Brown et al., 1967; Korn et al., 1979), 페놀 흡수 (Stickle, 1982)

등 다수의 보고를 찾아 볼 수 있다. 그러나 수온 및 염분 등의 환경요인이 페놀성 화합물의 독성과 호흡대사에 미치는 영향에 관해서는 계류와 mysid에 대한 연구 (Laughlin and Neff, 1980, 1981; Smith and Hargreaves, 1985) 외에는 희소하고, 패류나 복족류에 대한 보고는 찾아 보기 어렵다.

한편, 오염물질에 노출된 수서생물의 생존과 호흡대사에 관한 연구는 그 종의 민감성과 독성 영향에 대처하는 생리적 전략을 파악하는 수단으로서 이용되며 (Smith and Hargreaves, 1984), 오염원에 노출된 생물의 체내 축적 및 배설 패턴을 이해하는 자료로 활용될 수 있다 (Smith and Hargreaves, 1985). 특히, 오염원에 노출된 양식생물의 생존과 대사생리적 연구 결과는 양식생물의 효과적 관리를 위한 기초자료로서 가치가 있다고 생각된다.

참전복 (*Haliotis discus hannai*)은 이동이 비교적 적은 정착성의 복족류로서 해조류가 많은 연안의 암반지역에 주로 서식하며, 산업적으로 매우 중요한 위치에 있다. 최근에는 인공 종묘생산 기술이 보편화되어 우리나라 전 연안에서 육상수조식으로 종묘를 양산하고 있을 뿐만 아니라 수하식으로도 많이 양식이 되고 있다. 본 연구는 원유중의 유독성 오염원인 페놀이 참전복 치패의 생존과 호흡대사에 미치는 독성 영향을 염분별로 조사하였다. 그리고 급성 및 만성 독성농도의 페놀에 노출시킨 개체를 페놀이 없는 해수에 옮겨 생존을 측정과 함께 대조군의 대사율로 도달하는데 소요되는 기간을 산소소비를 지표로 조사하였다.

## 재료 및 방법

실험동물인 참전복 (*Haliotis discus hannai*)은 활력이 좋고 크기가 비슷한 것을 선별하여 수온 19~21°C의 자연해수를 유수시키면서 10일간 실내 사육하면서 먹이는 건조 다시마 (*Laminaria japonica*)를 2~3일 간격으로 충분한 양을 공급하였다. 실험에 사용한 참전복은 개체의 크기에 따른 생존율과 대사율 차이를 줄이기 위하여 각장은 1.8~2.2 cm (평균, 2.03 cm), 습육중은 0.83~0.94 g (평균, 0.87 g)의 치패를 골라서 실험전에 24시간 절식시켰고, 실험은 20°C로 조절된 항온실에서 실시하였다.

실험용액은 페놀 1.005 g을 ethanol 1 ml에 녹혀 염분 24‰ (23.6~24.3‰)와 32‰ (31.5~32.4‰)의 해수를 첨가해서 각각의 표준용액 (1,000 ppm)을 만든 다음 이것을 희석하여 염분별 실험농도로 제조하였다. 실험은 지수식으로 실시하였고, 지수식 조건에서 페놀농도는 24시간

이상 경과하면 농도가 감소하므로 (Angus, 1983) 실험용액은 매일 전량 교환하였다. 실험구는 유리 원형수조 (용량, 8 ℓ)를 사용하여 실험용액 4 ℓ과 함께 PVC 파이프 (φ 20 cm, L 20 cm)를 세로 절단한 은신처 (shelter)를 넣어서 공기를 약하게 공급하였다. 급성 및 만성독성 실험의 생존 및 호흡대사 실험구는 이후 페놀에 노출시킨 치패의 회복실험을 위하여 구분하여 각각 중복 실시하였고, 실험동안 페놀에 노출된 치패가 수면위에 부착하는 도피행동은 관찰할 수 없었다.

급성독성 실험은 염분별 페놀농도 0, 0.5, 1, 5, 10, 20, 50 및 100 mg/ℓ의 실험구에 치패를 각각 20마리 넣고 96시간 노출시키면서 12시간 간격으로 폐사한 개체를 조사하였다. 폐사 개체의 기준은 은신처와 수조벽면에 부착능력이 없고, 유리봉으로 발과 촉수를 자극하여도 반응이 없는 것을 계수하였다. 호흡대사율은 48시간과 96시간 노출시킨 후 페놀 농도별로 생존개체 2~3마리를 무작위로 뽑아 주간 산소소비를 측정하였다. 측정은 용량 약 300 ml의 산소측정병에 치패를 넣은 다음 20 ± 0.1°C로 조절된 항온순환수조 (MRC-3031D)에 두고 1시간씩 2회 반복하여 실험전후 용존산소 차이를 DO meter (YSI 59)와 자체 교반장치가 부착된 BOD probe (YSI 5331)를 사용하여 정량하였다. 산소소비 측정결과는 개체당 1시간에 소비한 산소량을 μℓ로 표시하였으며, 급성독성 실험 중 먹이는 공급하지 않았다.

만성독성 실험에서는 치패 20마리를 아치사농도 (sublethal concentration, 96hr-LC<sub>20</sub>)와 이의 반농도에 넣고 15일간 사육하면서 경과일수별로 생존율과 호흡대사율을 측정하였다. 먹이는 건조 다시마를 충분한 양을 공급하면서 산소소비 측정전 24시간은 절식시켰고, 호흡대사율은 2일 간격으로 전술한 방법과 같이 측정하였다. 한편, 급성독성 및 만성독성 농도의 페놀에 노출시킨 개체가 회복하여 생존하는 율과 대조군의 호흡대사율에 도달하는 소요시간을 파악하기 위하여, 페놀이 없는 같은 염분의 해수에 옮겨서 경과일수별로 생존율과 호흡대사율을 측정하였다. 회복에 미치는 급성독성의 영향 측정은 염분 24‰와 32‰의 10, 20 및 50 mg/ℓ 페놀농도에 치패를 각각 40마리 넣고 96시간 노출시켰고, 만성독성 영향측정은 염분별 아치사농도와 이의 반농도에 15일간 노출시켜서 조사하였다. 페놀에 노출된 참전복의 호흡대사율이 대조군에서 측정된 대사율의 95% 신뢰한계 하한값에 이르면 대조군의 대사율로 복귀한 것으로 간주하였다. 실험결과 반수치사농도 (LC<sub>50</sub>)와 반수치사시간 (LT<sub>50</sub>)은 SAS-probit법으로, 유의성은 ANOVA 분석으로 검정하였다.

**Table 1. LC<sub>50</sub> of the abalone juvenile *Haliotis discus hannai* exposed to phenol at 24‰ and 32‰ salinity**

Item	Salinity (‰)	Exposure time (hour)			
		24	48	72	96
LC <sub>50</sub> (mg/ℓ)	24	34.3	19.5	11.7	6.5
	32	52.2	25.9	18.0	9.3
LC <sub>50</sub> at 95% confidence limit	24	20.9~69.2	15.8~24.8	9.7~14.9	3.1~ 9.9
	32	44.0~63.7	22.0~30.7	14.7~22.6	7.6~11.4
pH*	24	8.02 ± 0.2	8.04 ± 0.3	8.04 ± 0.3	8.09 ± 0.4
	32	8.14 ± 0.4	8.08 ± 0.2	8.10 ± 0.5	8.11 ± 0.4
DO (mg/ℓ)*	24	7.41 ± 0.5	7.36 ± 0.6	7.42 ± 0.5	7.39 ± 0.5
	32	7.12 ± 0.3	7.18 ± 0.4	7.17 ± 0.6	7.23 ± 0.3

\* Data were presented as mean ± SD (n=8)

**Table 2. LT<sub>50</sub> of the abalone juvenile *Haliotis discus hannai* exposed to each concentration of phenol**

Item	Salinity (‰)	Phenol concentration (mg/ℓ)			
		5	10	20	50
LT <sub>50</sub>	24	108.4	88.0	41.1	18.8
	32	111.7	99.3	63.2	32.8
LC <sub>50</sub> at 95% confidence limit	24	93.5~141.0	80.5~ 96.4	30.3~49.0	11.2~29.4
	32	98.5~142.7	88.3~118.0	55.7~71.2	18.2~41.6

결 과

1. 급성독성의 영향

1) 반수치사농도 (LC<sub>50</sub>) 및 반수치사시간 (LT<sub>50</sub>)

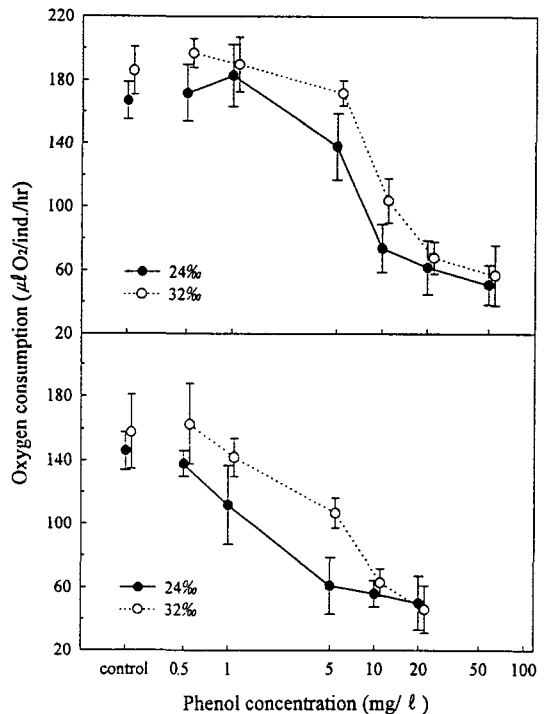
참전복 치패를 염분 24‰와 32‰에서 페놀농도별로 96시간 노출시켜서 반수치사농도를 산출한 결과는 Table 1과 같다. 각 염분별 대조구에서는 폐사개체가 없었으나 페놀 100 mg/ℓ에서 염분 24‰의 경우 48시간, 32‰에서는 72시간이 경과하면 모두 폐사하였다. 노출시간별 반수치사농도는 염분 32‰에 비하여 24‰ 해수에서 같은 농도의 페놀에 노출되었을 때 낮은 값을 보여, 참전복에 대한 페놀의 치사 독성은 저염분에서 높은 것으로 나타났다.

페놀농도별 반수치사시간을 산출해 본 바 (Table 2), 5~50 mg/ℓ에 노출시킨 개체의 반수치사시간은 염분 24‰에서는 108~19시간, 32‰에서는 112~33시간으로서 염분이 낮고 페놀의 농도가 높을수록 반수치사시간은 짧았다.

2) 산소소비

염분 24‰와 32‰에서 페놀농도별로 96시간 노출시키면서 48시간과 96시간째에 생존한 개체의 산소소비량을 측정하여 Fig. 1에 표시하였다.

페놀 농도별로 48시간 노출시킨 개체의 산소소비는 저염분 24‰에서 낮은 경향을 보였다. 염분 32‰, 페놀농도 0.5~5 mg/ℓ에서 산소소비량은 대조군에 비하여 다소



**Fig. 1. Oxygen consumption of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* exposed to phenol for 48 (upper) and 96 hours (lower) at 24‰ and 32‰ salinity.**

**Table 3. Survival rates of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* kept in phenol-free sea water after exposure for 96 hours to each concentration of phenol. The figure is percentage**

Salinity (%)	Phenol concentration (mg/l)	Number of tested organism	Elapse time (hours)						
			12	24	48	72	96	108	120
24	5	69	100	94	87	87	87	87	87
	10	24	92	75	63	63	63	63	63
	20	14	71	64	50	43	43	43	43
32	5	52	100	62	94	94	94	94	94
	10	40	95	88	83	80	80	80	80
	20	19	84	74	63	58	58	58	58

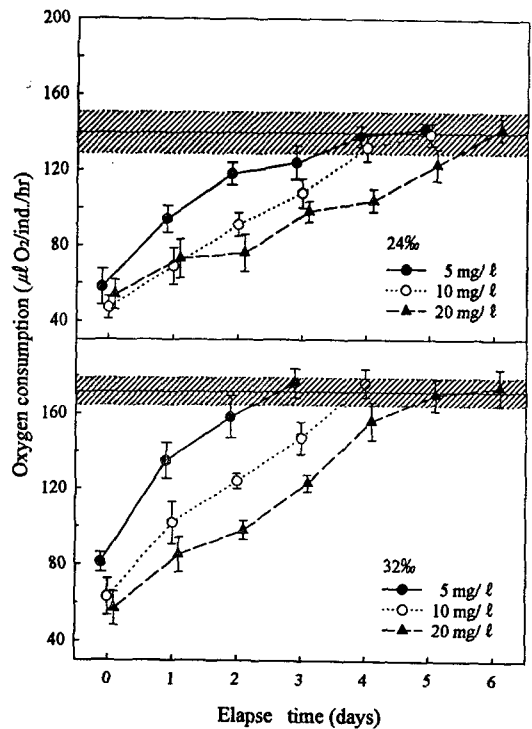
높거나 비슷하였고, 페놀농도가 10 mg/l로 높아지면 현저하게 감소하여 0.5~5 mg/l의 페놀에 노출시킨 실험군의 호흡량과 비교하여 유의한 차이를 보였다 ( $P < 0.05$ ). 염분 24‰에서 5 mg/l에 노출된 개체의 산소소비량은 대조군과 1 mg/l 노출군에 비하여 상당히 낮았다. 페놀 20 mg/l과 50 mg/l의 고농도에서는 산소소비량은 가장 낮았으나 페놀농도와 염분별로 유의한 차이는 없었다 ( $P > 0.05$ ).

96시간 동안 페놀농도별로 노출시킨 참전복의 산소소비량은 48시간 노출군에 비하여 매우 낮았으며, 0.5~5 mg/l 범위에서는 염분 32‰에 비하여 24‰에서 유의하게 낮은 호흡량을 보였다 ( $P < 0.05$ ). 페놀 50 mg/l의 고농도에서는 96시간 노출 후 전량 폐사하여 결과를 표시할 수 없었으며, 10 mg/l과 20 mg/l에서 페놀농도 및 염분별 산소소비량에는 유의한 차이가 없었다 ( $P > 0.05$ ).

3) 페놀에 노출된 참전복의 회복

참전복 치패를 페놀농도 5, 10 및 20 mg/l에 96시간 노출시킨 후 생존개체를 수거하여 염분 24‰와 32‰의 페놀을 함유하지 않은 해수에 옮겨서 생존율을 조사한 결과는 Table 3과 같다. 염분 24‰에서 페놀 5 mg/l과 10 mg/l 노출군은 24시간이 경과하는 동안 점진적인 폐사를 보였으나 48시간 이후의 생존율은 일정하였다. 페놀 20 mg/l 노출군은 72시간이 경과하는 동안에는 폐사가 발생하였으나 이후 폐사개체는 없었으며, 염분 32‰에서 페놀농도별 생존율은 24‰의 노출군에 비하여 7%~15% 높았다.

한편, 페놀 5, 10 및 20 mg/l에 각각 96시간 노출시킨 뒤, 생존개체를 페놀이 없는 같은 염분의 해수에 두고 경과일수별로 산소소비량을 측정하였다 (Fig. 2). Fig. 2에서 빗금 중앙의 실선은 대조군의 평균 호흡대사량이며, 빗금 부분의 위쪽과 아래쪽은 95% 신뢰한계에서 상한과 하한값을 각각 나타낸다. 참전복의 산소소비량은 고농도의 페놀에 노출된 개체에서 낮았으며, 시간이 경과함에 따라 호흡량은 급격하게 증가하였다. 염분 24‰에서



**Fig. 2. Changes in oxygen consumption of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* kept in phenol-free sea water phenol after exposure for 96 hours to each concentration of phenol. Solid line in dashed area represents mean oxygen consumption rate, and the upper and lower lines in the area are the upper and lower values of the rate of control at 95% confidence limit.**

5 mg/l과 10 mg/l의 페놀에 노출되었던 참전복은 4일째에, 20 mg/l에 노출되었던 것은 6일째에 대조군의 대사율에 도달하였다. 그리고 염분 32‰에서 페놀농도 5, 10 및 20 mg/l 노출군은 각각 3일, 4일 및 5일째에 대조군의 호흡대사율에 도달함으로써 저염분에서 소요시간이 길었다.

2. 만성독성의 영향

1) 장기 생존율

아치사농도 (96hr-LC<sub>20</sub>)와 이의 반농도에서 참전복 치패를 15일 동안 사육하면서 생존율을 조사한 결과는 Fig. 3과 같다. 15일 동안 대조구에서는 폐사개체가 없었으며, 실험농도별 치패의 생존율은 폐놀의 농도가 높고 노출이 지속될수록 낮아졌다. 염분 24‰에서는 노출시간이 경과함에 따라 생존율은 지속적으로 감소하였는데 0.8 mg/ℓ과 1.6 mg/ℓ에 15일 노출된 실험군의 생존율은 각각 78%와 53%였다. 반면 염분 32‰에서는 10일이 경과하면 비교적 안정된 생존율을 보였으며, 폐놀 1.2 mg/ℓ과 2.4 mg/ℓ에 15일 노출 후의 생존율은 각각 83% 및 65%였다.

2) 산소소비

참전복 치패를 염분별 96hr-LC<sub>20</sub>과 이의 반농도에 15일 동안 사육하면서 산소소비량을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 폐놀농도별 치패의 산소소비량은 노출 후 4일간은 대조군의 호흡량 범위에서 다소 변동을 보였지만 노출시간이 경과함에 따라 산소소비량은 점차 감소하였다. 그러나 염분별 아치사농도에 노출 후 10일이 지나면 호흡대사량은 적었지만 비교적 일정한 산소소비량을 유지하였다.

3) 저농도의 폐놀에 장기 노출된 참전복의 회복

96hr-LC<sub>20</sub>과 이의 반농도에 15일 동안 노출시킨 후 생존개체를 폐놀이 없는 같은 염분의 해수에 옮겨서 조사

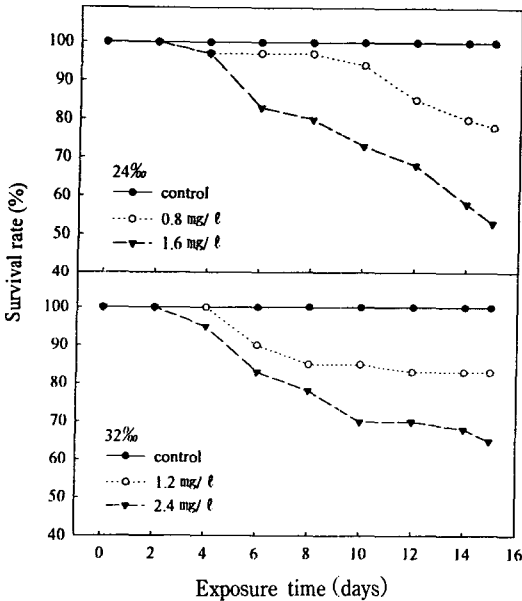


Fig. 3. Survival rates of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* exposed to sublethal concentration of phenol for 15 days.

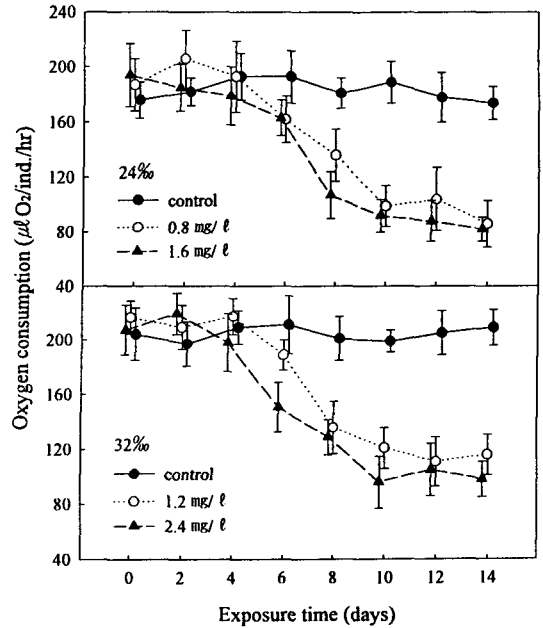


Fig. 4. Oxygen consumption of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* exposed to sublethal concentration of phenol for 15 days.

한 경과일수별 생존율을 조사한 결과를 보면 (Table 4), 염분 32‰에서 폐놀의 농도가 24‰에 비하여 높았으나 저염분에서 생존율은 낮게 나타났다. 염분별 아치사농도의 반농도에서는 3일 경과 후, 아치사농도에서는 4일이 경과하면 폐사개체는 없었다.

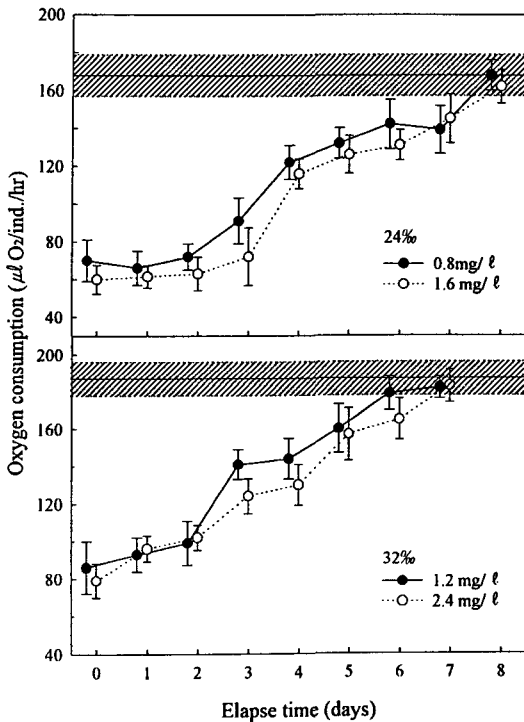
염분 24‰와 32‰의 96hr-LC<sub>20</sub>과 이의 반농도에 참전복 치패를 15일간 노출시킨 후 생존개체를 폐놀이 없는 같은 염분의 해수에 옮겨 경과일수별로 산소소비량을 측정된 결과는 Fig. 5와 같다. 염분별 폐놀농도에서 치패의 호흡대사율은 3일이 지나면서 증가하기 시작하여 5일째에는 대조군에서 측정된 평균 호흡율의 약 80%에 도달하였다. 그리고 염분 24‰에서는 8일째에, 32‰에서는 6~7일이 경과하면서 대조군의 호흡대사율을 유지하였다.

고 찰

대부분의 오염원이 생물의 생존에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 생리기능을 저해하는 것은 잘 알려진 사실이지만, 오염물질에 노출된 수서생물의 생체반응은 오염원의 물리·화학적 특성 및 그 농도와 노출시간에 따라 다르며, 수온과 염분 등의 환경요인과 생물종에 따라 많은 차이를 보인다 (Laughlin and Neff, 1980, 1981; Millemann et al., 1984).

**Table 4.** Survival rates of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* kept in phenol-free sea water after exposure for 15 days to sublethal concentration of phenol. The figure is percentage

Salinity (%)	Phenol concentration (mg/l)	Number of tested organism	Elapse time (hours)						
			1	2	3	4	5	6	7
24	0	40	100	100	100	100	100	100	100
	0.8	31	97	90	84	84	84	84	84
	1.6	21	91	81	71	66	66	66	66
32	0	40	100	100	100	100	100	100	100
	1.2	33	94	91	88	88	88	88	88
	2.4	26	88	81	77	73	73	73	73



**Fig. 5.** Changes in oxygen consumption of the abalone juvenile, *Haliotis discus hannai* kept in phenol-free sea water after exposure for 15 days to sublethal concentration of phenol. Solid line in dashed area represents mean oxygen consumption rate, and the upper and lower lines in the area are the upper and lower values of the rate of control at 95% confidence limit.

원유내 유독 성분인 페놀이 참전복 치패의 생존에 미치는 독성 영향을 염분 24‰와 32‰에서 조사한 결과, 저염분에서 노출시간이 경과함에 따라 LC<sub>50</sub>은 낮은 값을 보였다. 그리고 아치사능도의 페놀에 15일간 노출시켜서 측정된 장기 생존율도 페놀농도가 높고 노출시간이 경과할수록 24‰에서 낮은 값을 보임으로서, 참전복에 미치는 페놀의 치사독성은 저염분에서 높게 나타났다.

Heath (1987)는 원유내 방향족 탄화수소의 하나인 나프탈렌이 어류에 미치는 치사독성은 노출된 어류의 체내 축적과 직접 관련이 있으며, 염분이 나프탈렌의 축적과 대사에 미치는 영향에 관해서는 명확하지 않다고 하였다. 이에 반하여 Stickle et al. (1982)은 수온 및 염분과 같은 환경요인은 방향족 탄화수소의 대사에 영향을 주고, 조직내에서 이들 화합물의 독성을 배가시킨다는 상반되는 보고도 있다. 그러나 해산 무척추동물의 대부분은 삼투순응자로서 염분의 변화는 삼투조절 및 이온조절에 직접 영향을 미치며 (Jobling, 1995), 카드뮴에 노출된 fiddler crab과 새우류, *Plaeomonetes pugio*는 수온이 높고 염분이 낮아지면 카드뮴의 흡수율이 높고 (O'Hara, 1973; Vernberg et al., 1977), 카드뮴에 노출된 대하류, *Homarus americanus*는 저염분이 조직내 효소활성을 저해하였다 (Gould, 1980). 이러한 점을 감안하면 염분 저하는 오염원의 독성을 높이는 원인이 될 것으로 보여지는데 수온 25°C에서 소형 갑각류의 일종인 곤쟁이, *Archaeomysis kokuboi*에 대한 염분별 폐놀 반수치사능도는 염분이 낮을수록 감소한다고 보고하여 (Kim and Chin, 1995), 본 실험의 결과와 부합하였다. 따라서 폐놀에 노출된 참전복은 저염분이 폐놀의 체내 흡수를 높이는 역할을 하였거나 체내 축적된 폐놀의 독성을 가중시켜서 폐사에 이르게 하는 요인으로 작용하였다고 생각된다.

오염원에 대한 독성실험의 결과는 실험조건과 실험동물 등이 상이하기 때문에 직접적으로 비교하기에는 어려운 점이 있지만, 염분 32‰에서 측정된 참전복의 반수치사능도를 어류와 갑각류에 대한 기존의 결과와 함께 Table 5에 요약하였다. 참전복의 반수치사능도는 연어류의 *Oncorhynchus goroscha*, *Salmo salar* 및 곤쟁이, *Archaeomysis kokuboi*에 비하여 높았으나 Kelp shrimp, *Eva-lus suckley*와 비슷한 값을 보였다. 그리고 Buikema et al. (1979)은 수종의 무척추동물과 어류에 대한 폐놀 치사독성을 조사한 바 96hr-LC<sub>50</sub>은 각각 2~1,860 mg/l 및 4.2~34 mg/l 범위라고 하였다. 따라서 본 실험의 참전복은 폐놀의 독성에 민감하게 반응하는 종으로 보여진다.

Table 5. Lethal concentration of phenol for fishes and crustacea

Test organism	Life stage	Temp. (%)	Exposure time (hours)	LC <sub>50</sub> (mg/ℓ)	Reference
Crustacea					
<i>Daphnia magna</i>	Juvenile	19.5~20.5	48	19.8	Millemann et al. (1984)
<i>Gammarus minus</i>	Adult	21~24	48	37.4	Millemann et al. (1984)
<i>Acartia clausi</i>	Adult	—	24	32.3	Buttino (1994)
<i>Evalus suckley</i>	Adult	6	96	10.3	Korn et al. (1985)
<i>Archaeomysis kokuboi</i>	Adult	25	96	4.5	Kim and Chin (1995)
Fishes					
<i>Oncorhynchus goruscha</i>	Juvenile	6	96	3.7	Korn et al. (1985)
<i>Salmo salar</i>	Juvenile	5~7	96	3.5	Haya et al. (1985)
<i>Pimephales promelas</i>	Juvenile	20	96	25.6	Millemann et al. (1984)
<i>Gambusia affinis</i>	Adult	27	48	34.5	Angus (1983)
Gastropod					
<i>Haliotis discus hannai</i>	Juvenile	20	96	9.3	Present study

유류 성분에 노출된 수생생물은 생존을 위한 생리적 전략의 한 방법으로 오염원의 농도 및 노출시간에 따라 호흡대사율과 성장에 변화를 보인다 (Laughlin and Neff, 1980; 1981). 원유 WSF 0.2~1 mg/ℓ에 노출된 곤쟁이, *Neomysis integer*는 대조군에 비하여 산소소비율이 증가하였다 (Laughlin and Linden, 1983). 이것은 WSF의 아치사 독성에 대응하여 성장 또는 생식에 이용되는 에너지를 감소시켜 대사율이 증가하지만 환경요인의 변화에 대한 보상능력은 감소한다고 하였다 (Smith and Hargreaves, 1984). 그리고 곤쟁이, *Neomysis americana*의 경우 나프탈렌의 독성에 의한 호흡대사 보상작용은 96hr-LC<sub>50</sub>을 유발하는 농도 범위에서 수온이 증가하면 없어지는 현상을 보고하였다 (Smith and Hargreaves, 1985). 참전복은 급성독성 시험의 페놀농도에서 측정된 노출시간별 호흡대사율은 페놀농도가 높고 염분이 낮을수록 감소하였다. 그리고 페놀 농도별로 48시간 노출시킨 후 측정된 호흡율은 저농도에서는 대조군에 비하여 다소 높거나 비슷한 대사율을 유지하였고, 10 mg/ℓ에서는 호흡대사율이 유의하게 감소하는 현상을 보였다. 그러나 96시간 노출 후에는 저염분에서 유의하게 낮은 대사율을 보이면서 5 mg/ℓ에서 현저하게 감소하였다 (Fig. 1). 저농도에서 대조군의 대사율에 비하여 호흡량이 다소 증가하거나 비슷한 값을 유지하는 것은 페놀에 대한 생리적 저항의 결과로 추정되며, 아치사농도에서 격일로 먹이를 공급하며 측정된 경과일수별 호흡대사량이 상당기간 대조군의 대사율을 유지하는 점은 페놀에 노출된 참전복의 에너지 이용체계에 변화를 보인 것으로 판단된다.

수생생물이 오염원에 노출되면 오염원에 의한 조직의 손상과 체내축적 오염원의 대사에 소요되는 에너지 등

으로 체기능 유지를 위한 에너지가 부가적으로 필요하여 에너지 대사를 높게 유지한 것으로 여겨지는데, Smith and Hargreaves (1985)는 페놀이나 나프탈렌과 같은 방향족 탄화수소에 노출되었을 때 호흡대사율이 증가하는 해양생물의 경우, 해역내에 이들 화합물의 만성적인 오염이 진행되면 그 종의 풍도(abundance)에 영향을 미친다고 하였다. 보아 비록 저농도의 페놀이라 할지라도 장기간에 걸쳐 만성독성이 지속된다면 참전복 개체군에 미치는 전반적인 영향은 현저할 것으로 추정된다.

오염원에 노출된 생물의 호흡대사율은 오염원의 체내 축적과 유사한 패턴으로 증감하는 것이 곤쟁이, *Neomysis americana*에서 알려져 있다 (Hargreaves et al., 1982; Smith and Hargreaves, 1984, 1985). 고농도의 페놀에 96시간 노출시킨 후 페놀이 없는 해수에 옮긴 참전복의 생존율은 페놀의 농도가 높을수록 감소하였고, 저염분에서 낮은 생존율을 보였다. 아치사농도에 장기 노출된 참전복의 생존율은 고농도의 페놀에 단기 노출시킨 실험군에 비하여 높았지만, 대조군의 대사율에 도달하는 기간은 길었다. 본 실험의 참전복은 치사농도에 노출되더라도 영향농도 이하가 되면 회복이 비교적 빠른 특성을 보이며, 페놀의 만성독성에 의한 생리적 저해 영향이 높을 것으로 생각된다. 한편, 아치사농도에 장기 노출된 실험군은 고농도에 단기 노출시킨 것에 비하여 대조군의 대사율에 도달하는 기간이 긴 것은 노출된 페놀농도에 따른 체내 축적 및 배설과 관련이 있을 것으로 추정되는데, Osada et al. (1993)은 tributyltin oxide에 노출된 참굴, *Crassostrea gigas*은 저농도에서는 30일에 걸쳐 다량을 생체에 축적하는 반면, 고농도에서는 최대농도로 축적하는 시간은 짧지만 축적량은 저농도 노출군에 비해 적은

것으로 보고하였다. 그리고 Korn et al. (1985)은 pink salmon과 kelp shrimp의 폐놀 최대 축적시간은 24시간 경과 후이며, 폐놀이 없는 시수에서 24시간이 지나면 각각 축적된 폐놀의 21%와 64%를 보유하지만 pink salmon은 4일째에, kelp shrimp는 14일째에 체내에 잔존하는 폐놀을 간파할 수 없었다고 보고하여 폐놀의 축적 및 배출에 있어서 종간 차이를 제시하였다. 따라서 폐놀에 노출시킨 참전복의 폐놀농도 및 경과시간별 체내 축적에 관한 연구는 본 실험에서 조사한 호흡대사율의 결과를 반증하는 유용한 결과가 될 것이며, 이에 대한 계속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 요 약

원유중의 유독성 오염원인 폐놀이 참전복 치패의 생존과 호흡대사에 미치는 독성 영향을 염분별로 조사하였다. 그리고 급성 및 만성 독성농도의 폐놀에 노출시킨 개체를 폐놀이 없는 해수에 옮겨 생존율 측정과 함께 대조군의 대사율로 도달하는데 소요되는 기간을 산소소비를 지표로 조사하였다.

1. 폐놀에 대한 참전복 치패의 24~96시간 반수치사농도는 염분 24‰와 32‰에서 각각 52.2~9.3 mg/l 및 34.3~6.5 mg/l로서 폐놀의 치사독성은 저염분에서 높았다.

2. 급성독성 시험농도에서 측정된 산소소비는 저농도에서는 대조군에 비하여 다소 높거나 비슷한 호흡량을 보였으나 폐놀의 농도가 높고 염분이 낮을수록 산소소비량은 낮았다.

3. 아치사 농도에서 15일 노출 후의 생존율은 염분 24‰에서 폐놀 0.8 mg/l과 1.6 mg/l 노출군은 각각 78%와 53%였고, 노출시간이 경과함에 따라 생존율은 계속 감소하는 경향을 보였다. 염분 32‰에서 폐놀 1.2 mg/l과 2.4 mg/l 노출군의 생존율은 각각 83%와 65%였고, 노출 후 10일 이후에는 생존율 감소가 적었다.

4. 아치사 농도에서 15일 사육하며 노출시간별로 측정된 산소소비는 노출 후 4일 동안은 대조군과 비슷한 대사율을 보였으나 노출이 지속될수록 산소소비량은 감소하였으며, 염분별로는 저염분에서 산소소비는 낮았다.

5. 폐놀 5, 10 및 20 mg/l에 96시간 노출시킨 후 참전복의 회복 생존율은 염분 24‰에서는 43~87%, 32‰에서는 58~94%의 높은 생존율을 보였다. 그리고 대조군의 대사율로 도달하는 소요기간은 폐놀농도가 높을수록 저염분에서 소요기간이 길었다.

6. 아치사 농도에서 15일간 노출시켜서 조사한 회복

생존율은 염분 24‰에서는 66~84%, 32‰에서는 73~88%였다. 그리고 대조군의 대사율로 도달하는 소요기간은 저염분에서 길었으며, 급성독성을 초래하는 고농도에 노출된 실험군에 비하여 소요시간도 길었다.

## 참 고 문 헌

- Abemethy, S. A.M. Bobra, W.Y. Shiu, P.G. Wells and D. Mackay. 1986. Acute lethal toxicity of hydrocarbons and chlorinated hydrocarbons to two planktonic crustaceans: the key role of organism-water partitioning. *Aquat. Toxicol.*, 8, 163~174.
- Aheam, D.G. 1974. The sources, fates and effects of oil in the seas. In *Pollution and physiology of marine organisms*. F.J. Vernberg and W.B. Vernberg ed. Academic press, New York, pp. 247~252.
- Ahn, K.W. and P. Chin. 1986. Acute toxicity of Kuwait crude oil (WSF) to Mysid, *Noemysis awatschensis*. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 19, 599~607 (in Korean).
- Anderson, J.W., J.M. Neff, B.A. Cox, H.E. Tatem and G.M. Hightower. 1974. The effects of oil on estuarine animal: toxicity, uptake and depuration, respiration. In *Pollution and physiology of marine organisms*. F.J. Vernberg and W.B. Vernberg ed., Academic press, New York, pp. 285~310.
- Angus, R.A. 1983. Phenol tolerance in population of mosquitofish from polluted and nonpolluted waters. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 112, 794~799.
- Brown, V.M, D.H.M. Jordan and B.A. Tiller. 1967. The effect of temperature on the acute toxicity of phenol to rainbow trout in hard water. *Water Research*, 1, 587~594.
- Buikema, A.L., M.J. McGinness and J.C. Cairns. 1979. Phenolics in aquatic ecosystems: A selected review of recent literature. *Mar. Environ. Res.*, 2, 87~181.
- Buttino, I. 1994. The effect of low concentrations of phenol and ammonia on egg production rates, fecal pellet production and egg viability of the calanoid copepod *Acartia clausi*. *Mar. Biol.*, 119, 629~634.
- DeGraeve, G.M., R.C. Elder, D.C. Woods and H.L. Bergman. 1982. Effects of naphthalene and benzene on fathead minnows and rainbow trout. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 11, 487~490.
- Gerlach, S. A. 1981. *Marine pollution*, Spinger-Verlag, New York. pp. 71~96.
- Gould, E. 1980. Low-salinity stress in the American lobster, *Homarus americanus*, after chronic sublethal exposure to cadmium: Biochemical effects. *Helgolander meeresunters.*, 33, 36~46.
- Hargreaves, B.R., R.L. Smith, C.Q. Thompson and S.S. Herman. 1982. Toxicity and accumulation of naphthalene



- in the mysid *Neomysis americana*. Interaction with environmental temperature. In *Physiological mechanisms of marine pollutant toxicity*. W.B. Vernberg, A. Calabrese, F.P. Thurberg and F.J. Vernberg eds., Academic Press, New York, pp 391~412.
- Haya, K., B.A. Waiwood and L.E. Burrige. 1985. Liver energy metabolism and gill-ATPase activity of *Salmo salar* juvenile after exposure to sublethal levels of phenols. In *Marine Pollution and Physiology: Recent Advances*. F.J. Vernberg, F.P. Thurberg, A. Calabrese, and W. Vernberg eds., Univ. of South Carolina press, pp. 521~535.
- Heath, A.W. 1987. Water pollution and fish physiology. CRC press. pp. 76~81.
- Jobling, M. Osmotic and ionic regulation - water and salt balance. In *Environmental biology of fishes*. Chapman and Hall press. London, pp. 211~249.
- Kim, J.S. and P. Chin. 1995. Acute and chronic toxicity of phenol to mysid, *Archaeomysis kokuboi*. Bull. Korean Fish. Soc., 28, 87~97 (in Korean).
- Korn, S., D.A. Mole and S.D. Rice. 1979. Effects of temperature on median tolerance limit and pink salmon and shrimp exposed to toluene, naphthalene, and Cook Inlet crude oil. Bull. Envir. Contam. Toxicol., 21, 521~525.
- Korn, S., S.D. Rice, D.L. Cheatham and D.W. Brown. 1985. Contribution of phenol and *p*-cresol to the toxicity of crude oil to pink salmon fry and kelp shrimp. In *Marine Pollution and Physiology: Recent Advances*. F.J. Vernberg, F.P. Thurberg, A. Calabrese and W. Vernberg eds., Univ. of South Carolina press, pp. 447~458.
- Laughlin, R.B. and J.M. Neff. 1980. Influence of temperature, salinity, and phenanthrene (a petroleum derived hydrocarbon) on the respiration of larval mud crabs *Rhithropanopeus harristii*. Est. Coast. Mar. Sci., 10, 655~669.
- Laughlin, R.B. and J.M. Neff. 1981. Ontogeny of respiratory and growth responses of larval mud crabs *Rhithropanopeus harristii* exposed to different temperatures, salinities, and naphthalene concentrations. Mar. Ecol. Prog. Ser., 5, 319~332.
- Laughlin, R.B. and O. Linden. 1983. Oil pollution and Baltic mysid: Acute and chronic effects of the water soluble fractions of light fuel oil on the mysid shrimp *Neomysis integer*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 12, 29~41.
- Lee, B.D. T.Y. Lee and P. Chin. 1975. Effects of crude oil ingredients on the development and oxygen uptake of hard clam, *Meretrix lusoria* (RODING). Publ. Inst. Mar. Sci. Nat'l. Fish. Univ. Pusan, 8, 31~38 (in Korean).
- Lee, W.Y. 1978. Chronic sublethal effects of the water soluble fractions of no. 2 fuel oils on the marine isopod, *Sphaeroma quadridentatum*. Mar. Environ. Res., 1, 5~18.
- Lee, W.Y., M.F. Welch and J.A.C. Nicol. 1977. Survival of two species of amphipods in aqueous extracts of petroleum oils. Mar. Pollut. Bull., 8, 92~94.
- Millemann, R.E., W.J. Birge, J.A. Black, R.M. Cushman, K.L. Daniels, P.J. Franco, J.M. Giddings, J.F. McCarthy and A.J. Stewart. 1984. Comparative acute toxicity to aquatic organisms of components of coal-derived synthetic fuels. Trans. Am. Fish. Soc., 113, 74~85.
- O'hara, J. 1973. Cadmium uptake by fiddler crabs exposed to the temperature and salinity stress. J. Fish. Res. Bd. Can., 30, 846~848.
- Osada, M., T. Nomura and K. Mori. 1993. Acute toxicity and accumulation of tributyltin oxide in the Japanese oyster, *Crassostrea gigas*. Suisanzoshoku, 41, 439~443.
- Phipps, G.L., G.W. Holcombe and J.T. Fiandt. 1981. Acute toxicity of phenol and substituted phenols to the fathead minnow. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 26, 585~593.
- Smith, R.L. and B.R. Hargreaves. 1984. Oxygen consumption in *Neomysis americana* (Crustacea: Mysidacea), and the effect of naphthalene exposure. Mar. Biol., 79, 109~116.
- Smith, R.L. and B.R. Hargreaves. 1985. Respiration rate in the mysid *Neomysis americana*: effects of naphthalene, temperature, and other factors. In *Marine Pollution and Physiology: Recent Advances*. F.J. Vernberg, A. Calabrese, F.P. Thurberg and F.J. Vernberg eds., Univ. of South Carolina press, pp. 477~503.
- Stickle, W.B., T.D. Sabourin and S.D. Rice. 1982. Sensitivity and osmoregulation of coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*, exposed to toluene and naphthalene at different salinities. In *Physiological mechanism of marine pollution toxicity*. W.B. Vernberg, A. Calabrese, and F.J. Vernberg eds., Academic press, pp. 331~348.
- Swannell, R.P.J., K. Lee and M. McDonnagh. 1996. Field evaluations of marine oil spill bioremediation. Microbiological reviews, 60, 342~365.
- Vernberg, W.B., P.J. DeCoursey, M. Kelly and D.M. Johns. 1977. Effects of sublethal concentration of cadmium on adult *Palaemonetes pugio* under static and flow through condition. Bull. Envir. Contam. Toxicol., 17, 16~24.
- Vischnevetsky, F.E. 1962. The pathological morphology of the poisoning of fish by phenol and water-soluble components of crude oil, coal tar and fuel oil. Trudy Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Zapovednika. 5, 350~352 (Biological Abstracts 1963, 42, 1026).

---

1997년 4월 8일 접수

1997년 5월 9일 수리