

원자력발전소 온배수에 따른 우렁쟁이의 성장

김성길⁺ · 광희상* · 강주찬

부경대학교 수산생명의학과, *한국해양연구원 해양환경·기후연구부

Effects of Thermal Effluent from Nuclear Power Plant on Growth of Sea Squirt, *Halocynthia roretzi*

Seong-Gil KIM, Hi-Sang KWAK* and Ju-Chan KANG

Department of Aquatic Life Medicine, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

*Marine Environment and Climate Change Laboratory, KORDI, Ansan 425-600, Korea

To understand the effect of heated effluent from a nuclear power plant on marine organism, experimental culture of *Halocynthia roretzi* was carried out at heated effluent of Wolsung nuclear power plant from January to December 1996. Temperature was 11.2~27.9°C and salinity was 32.54~34.59‰ during the culture period. The Growth of *H. roretzi* on lower area of Bonggil-ri (St. 1) was not normal in height, breadth and weight due to heated effluent. Daily growth rate (DGR) of *H. roretzi* about Kampo area (St. 4) was significant other station, and St. 1 was significant from other station except St. 4. *Mytilus edulis* was major fouling organism (over 90%) that were *M. edulis*, *Dideninum moseleyi*, *Styela clava* in experiment culture farm. St. 1 was higher (mean 143 individual) and St. 4 was lower (mean 56 individual) appearance attached of *M. edulis*. Growth of *H. roretzi* reduced when attached number of *M. edulis* was increased, because correlation between DGR and number of *M. edulis* was negative.

Key words: *Halocynthia roretzi*, *Mytilus edulis*, Fouling organism, Wolsung nuclear power plant, Heated effluent, Temperature, Daily growth rate

서 론

수온은 해양생물의 생존을 비롯하여 성장 등에 많은 영향을 미치며, 생물에 따라 각각의 적온범위가 다르므로 급격한 수온상승은 생물에 따라 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 해양에 있어서 수온은 발전소 등에서 배출되는 온배수 등에 의하여 변화하며, 이로 인해 해양생태계에 많은 영향을 미친다 (Naylor, 1965). 발전소 온배수에 의해 상승된 수온의 범위가 27.2°C~31.0°C인 경우 부착성 근집구조가 우세하며, 37°C 이상의 수온에서는 수주고등 및 따개비류를 제외한 모든 동·식물이 소멸한다 (Suresh et al., 1993). 또한, Ahamed et al. (1992)은 발전소 온배수의 영향을 받는 해역에서는 소수의 수주고등과 남조류를 제외하고 해양생물 출현이 없었다고 보고하였다.

발전소 온배수에 의한 양식생물에 미치는 영향에 대한 연구는 굴의 성장과 품질, 넙치의 성장 및 뱀장어의 성장에 관한 연구가 있으며 (Tinsman et al., 1982; Innis, 1990; Anderson et al., 1991; Xu et al., 1991), 국내에서는 Kim and Lee (1988)가 담치 (*Mytilus edulis*)에 대한 발전소 온배수의 영향을 보고하였다. 특히, 우렁쟁이는 우리나라 동해안과 남해안의 외양성인 장소에 주로 분포하며 (Chung et al., 1989), 양식대상 종으로 이들에 미치는 환경요인에 대한 연구가 일부 수행되었으나 (Chung et al., 1989; Jang et al., 1982; Na et al., 1991; Roh et al., 1993; You et al., 1988), 발전소 온배수에 의한 영향이나 성장에 대한 연구는 수행된바가 없었다.

따라서 본 연구는 온배수에 의한 양식생물의 생산성을 파악하기 위하여 월성 원자력 발전소 온배수 확산 해역의 수온변화가 예상되는 정점에 우렁쟁이 양식장을 설치하여 성장을 관찰하였다.

재료 및 방법

1. 시험 양식장

시험 양식장은 발전소 배수구의 배수로 끝에서 약 400 m 떨어진 지점 (정점 1), 배수구 북동쪽 약 700 m 지점 (정점 2), 온배수 영향을 받지 않을 것으로 예상되는 배수구 북쪽 약 2.4 Km 지점 (정점 3) 및 어민 대조구 양식장으로 배수구 북쪽 약 8 Km 지점 (정점 4)에 설치하였다 (Fig. 1). 시험양식장은 4곳에 20 m×40 m 크기의 연승 수하식에 의해 1.5 m 간격으로 수심 1~4 m 이하에서 1996년 1월부터 12월까지 양식하였다 (Fig. 2).

2. 시험 양식장 환경조사

조사점점의 환경조사로는 시험양식장이 설치된 4개 정점에서 매월 1회씩 수온, 염분과 pH를 수층별로 조사하였다. 채수는 Van dorn 채수기를 이용하였고, 수온과 염분은 Electrode Induction Salinometer (KAHL/RS5-3)를, pH는 Oxidation-Reduction Electrode (Microcomputer 900, Palintest)를 이용하여 측정하였다.

3. 우렁쟁이 성장

우렁쟁이의 성장은 매월 1회 수하연 끝 (수심 약 5 m)에서 약 30~50 cm 절단하여 부착된 우렁쟁이를 모두 채집하여 체장, 체폭

⁺Corresponding author: cosmas@mail1.pknu.ac.kr

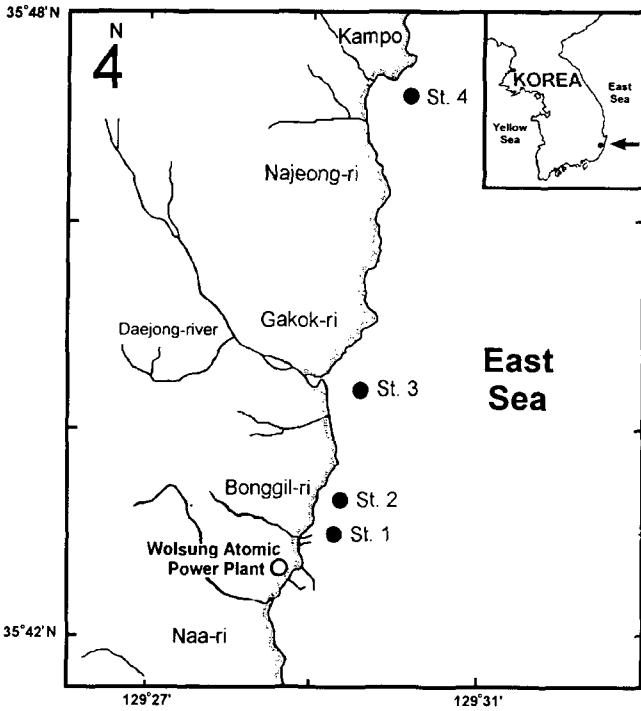


Fig. 1. Map showing the stations of the experimental fisheries culture farms in Wolsung, Korea.

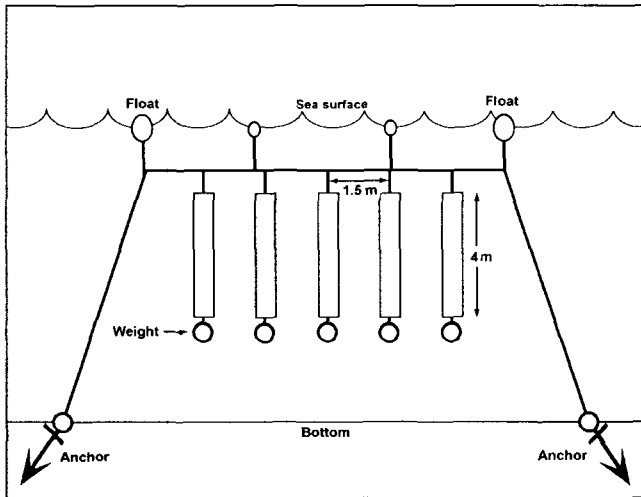


Fig. 2. A schematic diagram of the experimental fisheries culture system.

및 체중을 측정하였다. 체장과 체폭은 Jang (1979)의 방법으로 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였고, 체중은 여과지로 표면의 수분을 제거한 후 정량하였다. 일일성장률 (Daily Growth Rate: DGR)은 다음과 같은 식으로 계산하였다 (McGeer et al., 2000).

$$DGR = 100 \times [(\ln(w_t) - \ln(w_1)) / (t)]$$

w_t : height (weight) of end, w_1 : height (weight) of start
 t: the length of time in days

4. 부착생물의 조사

부착생물 조사는 매월 우렁쟁이를 채취할 때마다 수하연에 부착한 각종생물을 계수하였다. 크고 작은 다양한 부착생물이 있었으나, 우렁쟁이의 성장에 영향을 미치는 진주담치 (Jang, 1979; Kim et al., 1979; Roh et al., 1993)를 중심으로 계수하였다.

5. 통계처리

실험결과의 통계적 처리는 ANOVA test를 실시한 후 사후 다중 비교는 최소유의차 검정 (Least-significant difference test)을 통해 유의성 검정 ($p < 0.05$)를 실시하였으며, 상관분석은 상관분석이후 유의성 검정 ($p < 0.01$)을 실시하였다.

결 과

1. 조사정점환경

양식기간동안 수온은 1월에 정점 2와 3에서 11.2°C로 가장 낮았으며, 8월에 정점 1의 표층에서 27.9°C로 가장 높게 나타났다. 각 정점별 수온은 정점 1에서 11.4~27.9°C, 정점 2에서 11.2~25.9°C, 정점 3에서 11.2~25.2°C, 정점 4에서는 11.9~25.4°C로 나타나 다른 정점에 비해 정점 1에서 0.2~3.3°C 정도 높게 나타났다 (Fig. 3). 염분농도는 모든 정점에서 32.54~34.59‰로 나타났으며, pH는 8.26~8.49의 범위로 조사시기와 정점에 따라 변화가 거의 없이 안정적으로 나타났다 (Fig. 4).

2. 우렁쟁이의 성장

12개월 동안 각 정점에 따른 우렁쟁이의 체고, 체폭 및 체중 성장을 Fig. 5에 나타냈다. 우렁쟁이의 체고는 양식장 투여당시 평균 13.44 ± 0.34 mm이었던 것이 양성 12개월만에 정점 1에서 47.90 ± 1.31 mm, 정점 2에서 57.71 ± 1.13 mm, 정점 3에서 59.23 ± 1.34 mm, 정점 4에서는 73.36 ± 1.69 mm로 성장하였다. 월평균 체고 성장은 정점 4에서 7.34 mm로 가장 높게 나타났으며, 정점 2와 정점 3에서는 3.41~3.52 mm로 비교적 비슷한 성장을 보였으나, 정점 1에서는 2.00 mm로 다른 정점에 비해 낮은 성장을 나타냈다. 체폭은 양식장 투여 당시 10.15 ± 0.25 mm이었던 것이 양성 12개월만에 정점 1에서 40.38 ± 1.32 mm, 정점 2에서 46.51 ± 0.98 mm, 정점 3에서 52.17 ± 1.23 mm, 정점 4에서는 59.04 ± 0.47 mm로 나타났으며, 월평균 체폭성장은 정점 4에서 5.90 mm로 가장 높게 나타난 반면 정점 1에서는 2.07 mm로 가장 낮게 나타났다. 정점 2와 정점 3에서 월평균 체폭성장은 각각 2.54 mm와 2.98 mm를 보였다. 체중은 양식장 투여 당시 0.69 ± 0.05 g이었던 것이 양성 12개월만에 정점 1에서 39.38 ± 3.04 g, 정점 2에서 62.69 ± 2.74 g, 정점 3에서 69.03 ± 3.35 g, 정점 4에서는 143.94 ± 0.74 g으로 나타났다. 체중 성장은 정점 4에서 가장 높게 나타났으며 특히, 10월 이후에는 우렁쟁이의 수확기준인 체중 100 g을 초과했다. 정점 2와 3은 월평균 체중성장이 각각 3.74 mm와 4.28 mm로 정점 4에 비해서 낮았지만, 정점 1에 비해서는 높은 증가를 나타냈다. 우렁쟁이의 체고, 체폭 및 체중은 대체적으로 12월과 6월 사이 지속적으로 증가하다가 수온이 상승되는 7월에서 9월 사이 둔화되는 양상을 보이다가 9월

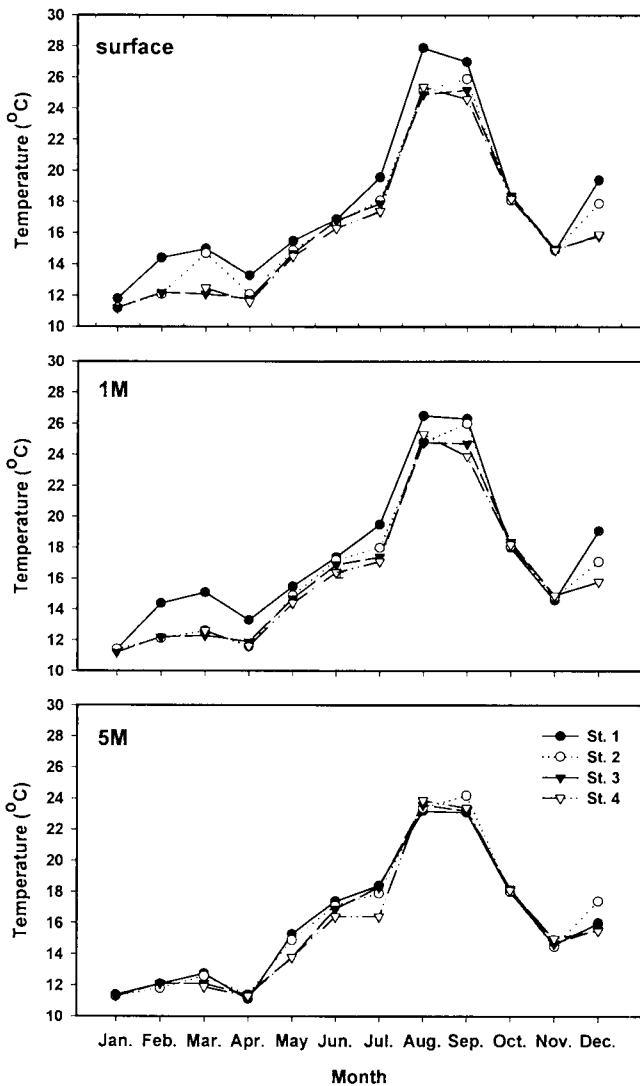


Fig. 3. Monthly variations of water temperature at water depth in the experimental fisheries culture farms.

이후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나, 정점 1에서는 수온이 상승하는 6월과 9월 사이는 물론 9월 이후에도 다른 정점들에 비해 낮은 성장률을 나타냈다.

우렁쟁이의 체고 및 체중에 대한 일일 성장률 (DGR)을 Fig. 6에 나타냈다. 6월 이후의 체고와 체중에 대한 일일 성장률은 대조구 (정점 4)와 정점 1이 다른 모든 정점과 유의한 차이가 인정되었으며, 정점 2와 3간의 유의성 ($p < 0.05$)이 없는 것으로 나타났다.

3. 부착생물

우렁쟁이 양식장에 출현한 부착생물은 진주담치 (*Mytilus edulis*), 흰덩이멍게 (*Didemnum moseleyi*), 미더덕 (*Styela clava*) 등이 있으며, 그 중 진주담치가 전체 출현 종의 90% 이상 차지하였다. 이러한 진주담치는 우렁쟁이 가입시기부터 5월까지 출현하지 않다가 6월경에서부터 10개체 이상씩 출현하기 시작하였으

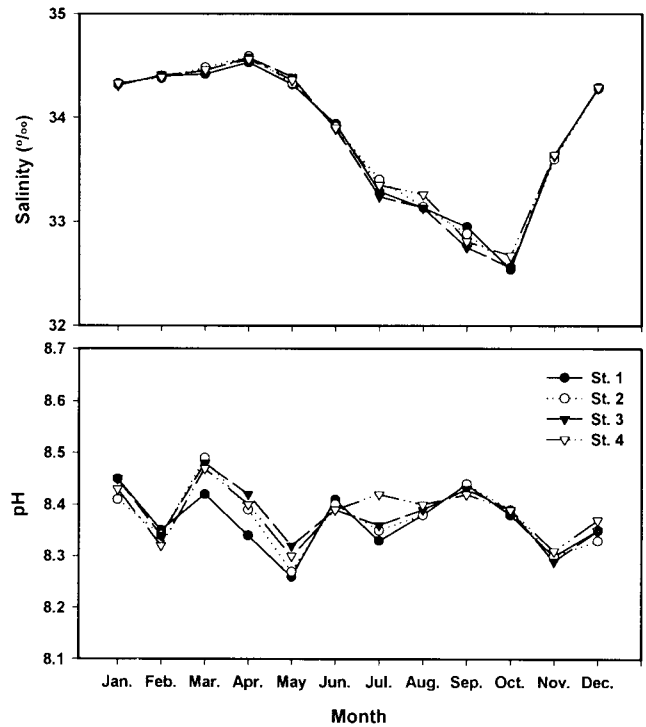


Fig. 4. Monthly variation of salinity and pH in the experimental fisheries culture farms.

며, 9월에는 진주담치의 개체수가 전 정점에서 상당한 양이 출현하였다. 각 정점별로 진주담치의 출현정도는 정점 1이 평균 143개체로 가장 많이 출현하였으며, 정점 4에서 평균 56개체로 가장 적게 출현하였다 (Fig. 7). 우렁쟁이의 체고, 체중의 일일 성장률과 진주담치의 출현 개체수 사이에는 음의 상관관계를 나타내어 진주담치의 출현이 증가할수록 우렁쟁이의 성장이 감소하였다 (Fig. 8).

고찰

우렁쟁이 양식장을 설치한 해역의 염분은 양식기간동안 32‰ 이상을 유지하였다. Jang et al. (1982)은 염분 30‰ 이상에서는 우렁쟁이의 생리생태에 영향이 없으며, Kim (1980)은 염분 29.2~32.0‰에서는 우렁쟁이의 양식에 영향이 없다고 하였다. 본 조사에서 염분은 모두 양식장 설치해역에서 32‰ 이상을 유지하여 겨울에는 높고 여름에는 낮게 나타나는 전형적인 동해안의 염분변화를 나타내어 염분에 의한 우렁쟁이의 성장에는 영향이 없었을 것으로 생각된다.

온대수역 온배수 배출수는 기준은 주 평균수온의 증가가 연중 1.0℃를 넘지 않아야 하고, 여름철 해수의 최고수온이 27.8~29.4℃ 이내이어야 하며, 순간적인 최고 수온 변화는 30.6~32.2℃ 이내이어야 한다 (EPA, 1976). 본 조사에서 수온변화는 온배수의 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되는 정점 1에서 거의 모든 기간동안 다른 정점에 비해 최고 3.3℃까지 높게 나타났으며, 특히 8월에는

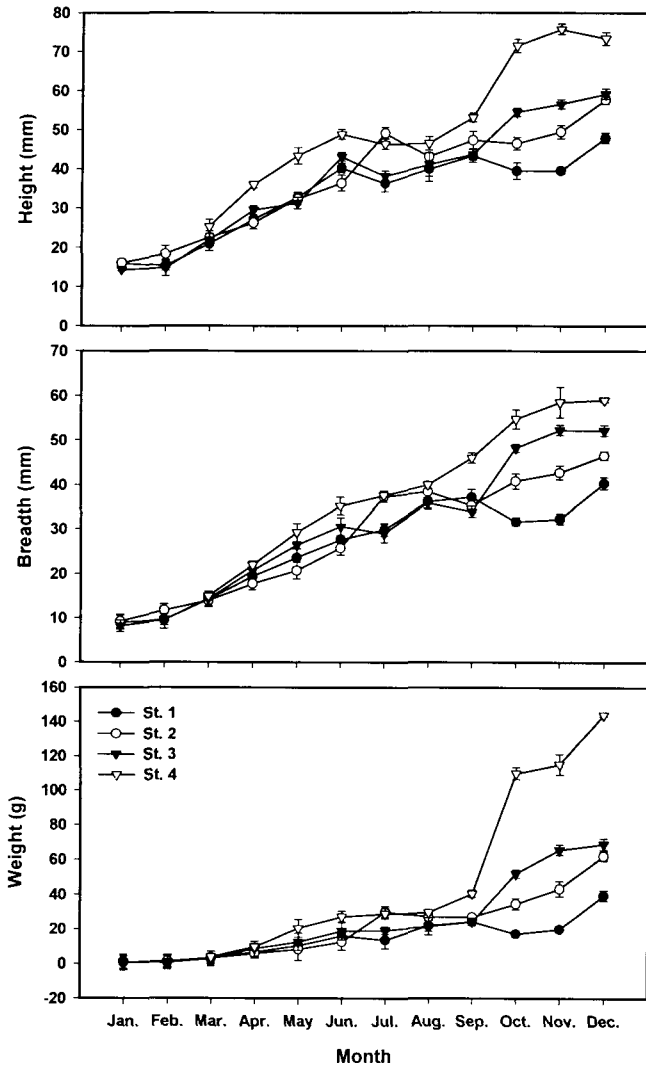


Fig. 5. The growth of body height, breadth and weight of *Halocynthia roretzi* D. Vertical bar denotes a standard error about mean.

27.9°C까지 상승하였다.

우렁쟁이는 통상 고수온에 대하여 민감성을 나타낸다 (菊池, 1976; Kim, 1980). 즉, 수온 25°C 이상에서 대사기능이 장애를 일으키며, 26.5°C에서는 입수공 및 출수공을 닫고 사망하기도 한다 (Kim, 1980). 본 조사에서는 8월과 9월에 모든 정점에서 우렁쟁이가 대사기능에 장애를 일으킬 수 있는 25°C를 초과하였으며, 이 시점에서 우렁쟁이의 성장 감소를 나타냈다. 즉, 우렁쟁이의 체고, 체폭 및 체중은 1월과 6월 사이 지속적으로 증가하다가 수온이 상승되는 7월에서 9월 사이 둔화되는 양상을 보이다가 9월 이후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고, 정점 1에서는 수온이 상승하는 6월과 9월 사이는 물론 9월 이후에도 다른 정점들에 비해 낮은 성장률을 나타냈다. 우렁쟁이의 체고 및 체중에 대한 일일 성장률은 대조구 (정점 4)에 모든 정점에서 유의한 감소를 나타냈으며, 정점 1에서는 정점 2와 3에 비해서도 유의한 감소를 나타냈

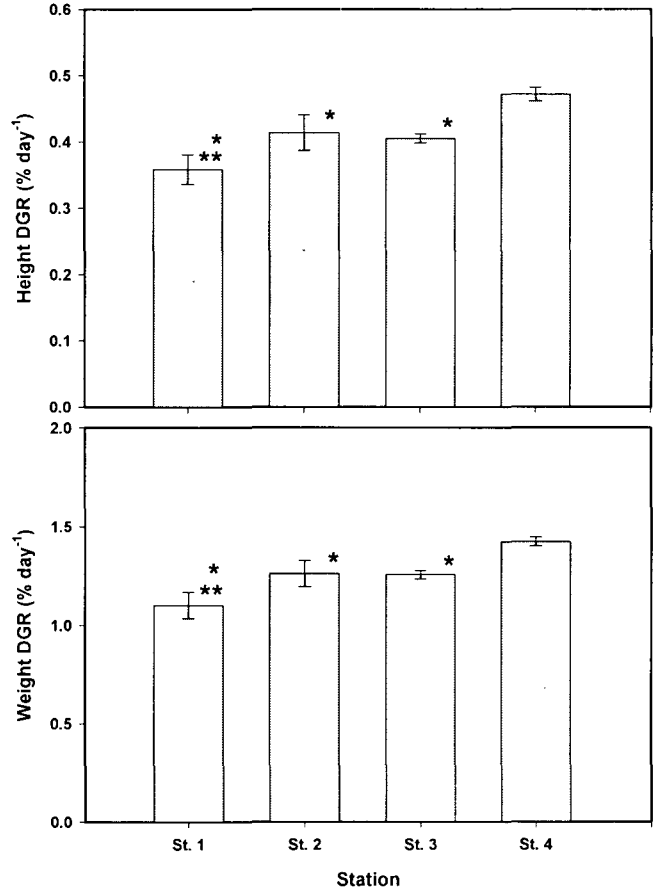


Fig. 6. Mean daily growth rate (DGR) in *Halocynthia roretzi* reflecting significant ($p < 0.05$) from June to December 1996. Vertical bar denotes a standard error about mean. *indicated a significant difference from st. 4 and **indicated a significant difference from st. 2 and 3.

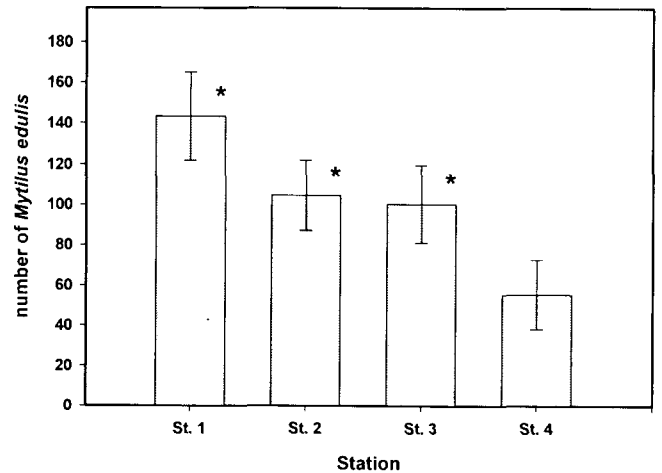


Fig. 7. Mean number of attached *Mytilus edulis* reflecting significant ($p < 0.05$) from June to December 1996. Vertical bar denotes a standard error about mean. *indicated a significant difference from st. 4.

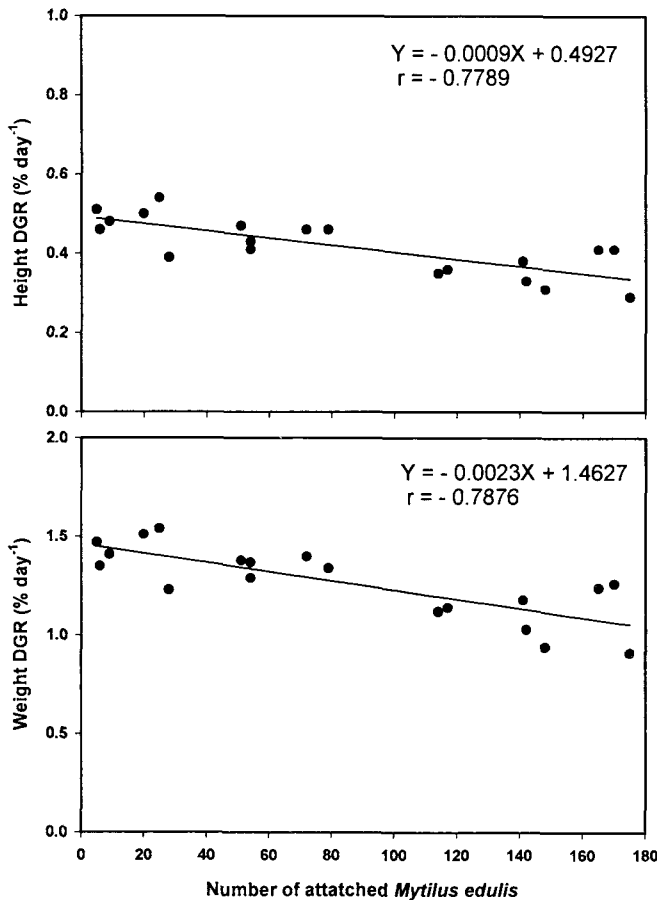


Fig. 8. Relationship between daily growth rate (DGR) and number of attached *Mytilus edulis* reflecting significant ($p < 0.01$).

다. 이 같은 결과는 다른 정점에 비해 정점 1에서 발전소 온배수에 의한 수온상승이 우렁쟁이의 성장에 많은 영향을 미쳤을 것으로 추측된다. 즉, 정점 4 (대조구)의 수온은 8월과 9월 사이 23.4°C~23.9°C로 약간 상승하였으나, 연중 우렁쟁이의 성장에 알맞은 12.0~20.0°C (Zhang and Lim, 1990)의 범위를 유지하였으나, 정점 1에서는 대사기능에 장애를 일으킬 수 있는 25°C 이상을 나타내었다.

우렁쟁이의 양식에 있어 부착생물의 존재는 우렁쟁이의 성장에 영향을 미친다. Roh et al. (1993)은 우렁쟁이 양식장에 부착되는 진주담치는 우렁쟁이의 성장을 감소시키며, 우렁쟁이의 부착강도도 약화시켜 수하연에서 탈락시키는 주요요인이 된다고 하였다. 본 연구에서 우렁쟁이의 성장과 진주담치의 관계를 비교한 결과, 부착생물의 증가함에 따라 성장률은 감소하는 상관관계를 보였으며, 정점 1에서 가장 많은 진주담치의 출현을 보였다. 따라서, 발전소와 가장 인접한 정점 1의 우렁쟁이 양식장에서는 수온과 더불어 진주담치의 부착에 의한 성장을 감소도 있었을 것으로 생각된다. 즉, 우렁쟁이의 해적생물이라고 할 수 있는 진주담치는 폐사수온이 40.0°C로 고수온에 강한 내성을 지니고 있어 (Bae, 1979) 이들의 출현은 우렁쟁이의 성장에 커다란 영향을 미친 것으로 생각된다.

따라서, 연안에 있어 발전소 온배수의 유입은 인근해역의 수온을 상승시키며, 특히 7~9월 시기의 고수온기에는 자연적으로 상승된 수온을 2~3°C 더 상승시키는 결과를 가져온다. 또한, 이 시기에는 우렁쟁이의 성장적온인 12.0~20.0°C의 범위를 벗어나게 되며, 우렁쟁이의 생리적 영향을 받을 수 있는 25.0°C를 초과하여 우렁쟁이의 성장에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 또한, 수온이 상승과 함께 우렁쟁이 양식장의 부착생물인 진주담치의 출현은 수온 상승에 대한 중간경쟁에서 탈락하게 되어 우렁쟁이의 양식에 많은 악영향을 미칠 것으로 예상된다.

요 약

원자력 발전소의 온배수로 인한 우렁쟁이, *Halocynthia roretzi*에 미치는 영향을 파악하기 위하여 1996년 1월부터 12월까지 온배수 배출해역을 중심으로 시험양식장을 설치하여 성장을 검토하였다.

양식기간동안 수온은 8월에 정점 1의 표층에서 27.9°C까지 상승하였으며, 염분농도는 모든 정점에서 32.54~34.59‰를 나타냈다.

우렁쟁이의 성장은 정점 4에서 가장 좋았으며, 온배수의 영향을 받은 정점 1에서 가장 좋지 못하였다. 우렁쟁이의 체고 및 체중에 대한 일일 성장률은 대조구 (정점 4)에 비해 모든 정점에서 유의한 감소를 나타냈으며, 정점 1은 정점 2와 3에 비해서도 유의한 감소를 나타냈다.

우렁쟁이 양식장에 출현한 부착생물은 진주담치 (*Mytilus edulis*), 흰덩이멍게 (*Didemnum moseleyi*), 미더덕 (*Styela clava*) 등이 있으며, 그 중 진주담치가 전체 출현 종의 90% 이상 차지하였다. 진주담치의 출현은 정점 1이 평균 143개체로 가장 많이 출현하였으며, 정점 4에서 평균 56개체로 가장 적게 출현하였다. 우렁쟁이의 체고, 체중의 일일 성장률과 진주담치의 출현수 사이에는 음의 상관관계를 나타내어 진주담치의 출현이 증가할수록 우렁쟁이의 성장이 감소하였다.

참 고 문 헌

- Ahamed, M.S., G. Durairaj, K. Suresh and K.V.K. Nair. 1992. Effect of power plant heated effluent on distribution of sedentary fauna and flora. *Indian J. Mar. Sci.*, 21, 188~191.
- Anderson, J., O. Sandstroem and H.J.M. Hansen. 1991. Elver (*Anguilla anguilla* L.) stocking in a Swedish thermal effluent-recaptures, growth and body condition. *J. Appl. Ichthyol.*, 7, 78~89.
- Bae, S.W. 1979. On the warm seawater disposal to stamp out the epiphytic mussel (*Mytilus edulis* L.) on the hanging line oyster. *Bull. Gunsan. Fish. J. Coll.*, 13, 51~56 (in Korean).
- Chung, S.K., S.K. Yoo and S.D. Lee. 1989. The growth of sea squirt, *Halocynthia roretzi* (V. Drasche), at different water depths at the eastern coast of Korea. *Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 43, 127~136 (in Korean).
- U.S. EPA. 1976. Quality Criteria for Water. EPA-440/9-76-023. Washington, D.C., 501p.

- Innis, D.B. 1990. Juvenile California halibut, *Paralichthys californicus*, growth in relation to thermal effluent, The California Halibut, *Paralichthys californicus*, Resource and Fisheries, 174, 153~166.
- Jang, D.S., S.K. Chun, S.C. Cheong and H.L. Seo. 1982. A study on the mortality of sea squirt, *Halocynthia roretzi* (Drasche). Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, 29, 7~40 (in Korean).
- Jang, Y.J. 1979. Studies on the early growth of the Sea squirt, *Halocynthia roretzi* (Drasche). Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, 21, 69~76 (in Korean).
- Kim, J.D., S.C. Chung and H.W. Kang. 1979. Studies on the culture and air experiments of sea squirt, *Halocynthia roretzi* (V. Drasche). Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, 22, 71~80 (in Korean).
- Kim, S.Y. and T.K. Lee. 1988. The effect of pollutants effluent from a steam-power plant on coastal bivalves. Ocean Research, 10, 47~65 (in Korean).
- Kim, Y.G. 1980. Ecological study on the transplantation of sea squirt, *Halocynthia roretzi* (V. Drasche) to gogunsan islands. J. Korean Fish. Soc., 13, 57~64 (in Korean).
- McGeer, J.C., C. Szebedinszky, D.G. McDonald and C.M. Wood. 2000. Effects of chronic sublethal exposure to waterborne Cu, Cd or Zn in rainbow trout. I: Iono-regulatory disturbance and metabolic costs. Aquat. Toxicol., 50, 231~243.
- Na, K.H., C.H. Lee and W.J. Choi. 1991. The effect of dissolved oxygen on the estival mass mortality of sea squirt, *Halocynthia roretzi* (Drasche). J. Korean Fish. Soc., 24, 52~58 (in Korean).
- Naylor, J.W. 1965. Effects of heated effluents upon marine and estuarine organisms. Adv. Mar. Biol., 3, 63~103.
- Rho, Y.G., Y.H. Lee and M.W. Park. 1993. The environmental factors affecting mortality of cultured sea squirt, *Halocynthia roretzi* (Drasche). Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency, 47, 145~164 (in Korean).
- Suresh, K., M.S. Ahamed, G. Durairaj and K.V.K. Nair. 1993. Impact of power plant heated effluent on the abundance of sedentary organisms, off Kalpakkam, East coast of India Hydrobiologia, 268, 109~114.
- Tinsman, J.C., D. Maurer and K.A. Pennachi. 1982. Biological responses of the American oyster *Crassostrea virginica* (Gmelin) to thermal effluent in the Chesapeake-Delaware Bay area. University of Delaware, Maryland power plant research program-46, 107p.
- Xu, L., L. Fangyong, T. Hongyun and W. Junsan. 1991. Impact of thermal effluent from coastal thermo-electric power plant on oyster's growth and quality. Mar. Environ. Sci. Haiyang Huanjing Kexue, 10, 6~11.
- Yoo, S.K., H.S. Lim and D.T. Lim. 1988. On the growth the sea squirt, *Halocynthia roretzi* (Drasche) from artificial seeds. J. Aquaculture, 1, 75~84 (in Korean).
- Zhang, C.I. and H.S. Lim. 1990. Population ecological study of cultured sea squirt (*Halocynthia roretzi*) and management implications. J. Aquaculture, 3, 49~63 (in Korean).
- 菊池要三郎. 1976. マボヤの成長と養殖に關ある試験. 養殖, 13, 98~99 (in Japanese).

2001년 9월 6일 접수

2002년 1월 19일 수리