

먹이종류 및 공급량에 따른 기수산 물벼룩, *Diaphanosoma celebensis*의 성장

박진철*·박흥기
강릉원주대학교 해양생명공학부

Growth of the Brackish Water Flea, *Diaphanosoma celebensis*, on Different Foods and Food Concentrations

Jin Chul Park* and Heum Gi Park

Department of Marine Bioscience & Technology Graduate School,
Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

This study determined the optimum microalgae species and concentration for the brackish water flea, *Diaphanosoma celebensis*, in individual and community cultures by feeding it several different diets. Six single trials (*Tetraselmis suecica*, *Isochrysis galbana*, marine *Chlorella ellipsoidea*, freshwater *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* sp., *Selenastrum* sp.) were conducted at 10 psu and 30°C. The community and individual cultures of the water flea were performed in 1-L beakers and 3-mL vessels (12-well culture plates), respectively. In the community cultures, the maximum density and specific growth rate were highest for water fleas fed *T. suecica*, reaching 60.0 individuals (ind.)/mL and 0.40, respectively. In the individual cultures, the most offspring and greatest life span of females were 56.9 ind. and 24.3 days, respectively, in the *T. suecica* trial. By contrast, diets of *Scenedesmus* sp. and *Selenastrum* sp. resulted in poor growth rates. In the *T. suecica* experiments examining a range of 10 to 200×10³ cells/indl. the specific growth rate of the water flea tended to increase with the amount of supplement, while the life span decreased. The maximum density and number of offspring of females was highest at 53.5 ind./mL and 38.8 ind. respectively, at 40,000 cells/ind. These results suggest that the best microalgae species for the mass culture of *D. celebensis* is *T. suecica* and the optimum concentration is 40,000 cells per individual.

Key words: *Diaphanosoma celebensis*, Food, Concentration

서 론

지각류인 물벼룩은 여과섭식을 행하며 주먹이인 식물플랑크톤은 물론 섬모충 및 박테리아까지도 먹이원으로 이용하기 때문에 먹이의 이용성이 매우 광범위한 종이다 (Urabe and Watanabe, 1991; Fileto et al., 2004; Kumar and Hwang, 2008). 이러한 물벼룩은 먹이로 공급되는 식물플랑크톤의 종류에 따라 개체발달을 위한 성장률이 다르게 나타난다 (Gulati and DeMott, 1997; Fileto et al., 2004). 또한 먹이종류마다 생화학적 구성 성분이 다르며, 이러한 질적 차이는 지각류의 생식력에도 영향을 미치게 된다 (Urabe et al., 1997; Sterner and Schulz, 1998; Fileto et al., 2004). 따라서 물벼룩을 배양함에 있어 그들의 성장 및 생식을 위한 최적 먹이생물의 규명은 반드시 필요하다. 과거에는 담수산 *Moina* sp. 및 *Daphnia* sp. 종들을 배양하기 위해 연못에 소퐁, 돼지똥 및 쌀겨 등과 같은 다양한 먹이형태를 공급하여 대량배양을 행하였으며 (Ventura and Enderez, 1980; Balasubramanian and Bai, 1994), 최근에는 담수산 물벼룩인 *Moina macrocopa*를 대량배양하는데 있어 세포의 크기가 작고 경제적인 담수산 *Chlorella* sp.를 가장 많이 이용하고 있다 (Nandini and Sarma, 2000; Zhang et al., 2006). 그러나 기수산 및 해산 물벼룩의 주요 먹이생물에 관한 연구는 아직

도 규명되지 않은 상태이다.

한편, 먹이의 공급량은 동물플랑크톤을 배양함에 있어 그들의 생산, 생존율 및 대사작용 등에 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 환경인자이다 (Duncan, 1989; Martínez-Jerónimo and Gutiérrez-Valdivia, 1991). 또한 Park et al. (1999)은 동물먹이생물의 대량생산과정에서 먹이공급비가 총 생산경비의 약 87%를 차지하여 적정 먹이공급량을 초과할 경우 먹이당비로 이어져 경제적 측면에서도 매우 중요하다고 지적하였으며, Yoshimatsu et al. (1997)은 먹지 않고 남은 여분의 먹이는 배양수의 오염을 발생시키는 것은 물론 먹이생물의 수확부터 자어에게 공급을 방해하는 찌꺼기 형성의 원인이 된다고 보고하였다. 이처럼 경제적, 효율적 및 안정적인 지각류의 대량배양을 위해서는 그들에게 공급되는 먹이의 공급량을 반드시 규명할 필요가 있는 것이다.

이러한 관점에서 본 연구는 기수산 물벼룩, *D. celebensis*의 대량배양을 위해 이들의 최적 먹이생물과 그에 따른 공급량을 조사하였다.

재료 및 방법

기수산 물벼룩인 *D. celebensis*의 최적 먹이생물의 종류와 그에 따른 공급량을 규명하기 위한 실험은 밀집배양과 개체배양으로 나누어 수행하였다.

*Corresponding author: telss88@naver.com

실험 먹이로 사용된 식물플랑크톤의 종류는 부경대학교 한국미세조류은행으로부터 분양받은 해수산 *Chlorella ellipsoidea* (KMCC-C-39, SCH), *Isochrysis galbana* (KMCC-H-9, ISO), *Tetraselmis suecica* (KMCC-P3, TET)와 경기대학교 담수조류은행에서 분양받은 담수산 *Chlorella vulgaris* (FCH), *Scenedesmus* sp. (SCE) 및 *Selenastrum* sp. (SEL)을 이용하였다. 식물플랑크톤은 각각의 종을 배양하여 단독 공급구로 공급하였다. 밀집배양 실험은 1 L 비커 (배양수 500 mL)에 5개체/mL로 접종하여 10 psu, 30°C 조건하에서 수행되었다. 먹이 공급량은 물벼룩 1,000 개체 당 먹이 건조중량 2 mg을 기준으로 1일 1회 공급하였다. 실험은 25일간 이루어졌으며 모든 실험은 3회 반복하였다. 개체배양 실험은 밀집배양과 동일한 먹이 조건으로 12 wells culture plate (배양수 3 mL)에 갓 산란된 *D. celebensis*의 어린 유생을 한 마리씩 접종한 후 발달단계, 산란수 및 수명을 조사하였다. 다만, 밀집배양 실험에서 전량 폐사가 나타난 SCE 및 SEL 실험구는 제외하였다.

먹이 공급량에 따른 실험은 가장 효과적인 먹이였던 *T. suecica*를 사용하여 개체 당 10,000, 20,000, 40,000, 80,000 및 200,000 cells로 나누어 행하였다. 접종밀도는 2 L 비커 (배양수 500 mL)에 5개체/mL로 하였고 배양조건은 10 psu, 30°C로 설정하였다. 실험은 15일간 이루어졌으며 모든 실험은 3회 반복하였다. 환수는 3일마다 전량환수를 행하였으며, 폭기는 따로 시켜주지 않았다. 개체배양의 실험은 밀집배양과 동일한 실험구로 12 wells culture plate (배양수 3 mL)에 갓 산란된 *D. celebensis*의 어린 유생을 한 마리씩 접종한 후 발달단계, 산란수 및 수명 등을 조사하였다.

한편, 먹이종류 및 공급량에 따른 밀집배양 실험에서 성장률 (Specific growth rate, r)은 Rico-Martinez and Dodson (1992)의 방법에 따라 계산하였다. 또한 개체배양 실험은 계대배양 하던 *D. celebensis* 중에서 처녀생식으로 포란한 암컷을 따로 분리 수용하여 30분 간격으로 금방 산란된 어린 유생을 확인한 뒤, 12 wells culture plate (배양수 3 mL)에 한 마리씩 접종하여 폐사할 때까지 관찰하였다. 실험기간은 각각의 암컷이 폐사하는 시기까지로 하여 어린 유생단계부터 첫 번째 알을 포란하여 처음으로 유생을 산란하는 시간까지를 생식 전 단계 (Pre-reproductive phase), 첫 번째 유생을 산란한 후 수명 내에 마지막 유생을 산란할 때까지를 순 생식 단계 (Reproductive phase), 암컷의 수명 및 총 산란수로 각각 구분하여 관찰하였다. 관찰간격은 생식 전 단계는 1시간 간격으로 관찰하였으며, 이후부터는 12시간 간격으로 조사하였다.

모든 실험결과는 one-way ANOVA-test를 실시 후 Duncan's multiple range test (Duncan, 1955)를 실시하여 평균 간의 유의성 ($P < 0.05$)을 SPSS program (Ver. 14.0)으로 검정하였다.

결 과

*D. celebensis*의 최적 먹이생물

먹이종류에 따른 밀집배양에서 기수산 물벼룩인 *D. celebensis*의 밀도변화 및 개체성장률은 Fig. 1과 2에 나타내었

다. 최고밀도는 TET 실험구에서 배양 14일째 60.0개체/mL로 유의적으로 가장 높게 나타났으며 ($P < 0.05$), 그 뒤로 SCH 실험구가 배양 15일째 48.3개체/mL로 높게 나타났으며 ($P < 0.05$). 반면에 ISO, FCH 실험구는 TET 및 SCH 실험구에 비해 유의적으로 낮게 나타났으며 ($P < 0.05$). 또한 SCE 및 SEL 실험구는 접종 7일째 모두 폐사하는 것으로 조사되었다. 최고 밀도에 따른 개체성장률 (r)은 TET 실험구에서 0.40으로 유의적으로 높은 값을 보였으며, SCE 및 SEL은 유의적으로 가장 낮은 값을 나타내었다 ($P < 0.05$).

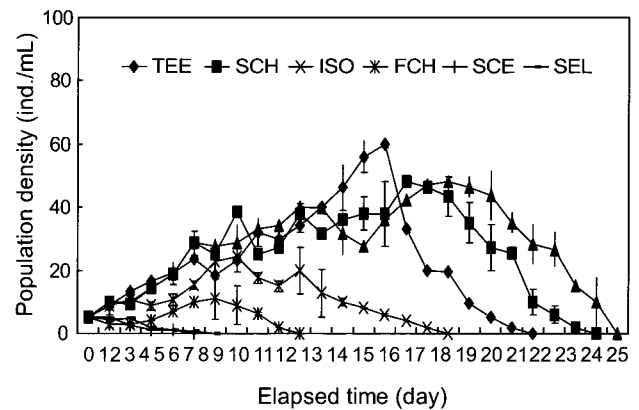


Fig. 1. Population growth of *D. celebensis* fed the different foods; *Tetraselmis suecica*, TET; marine *Chlorella ellipsoidea*, SCH; *Isochrysis galbana*, ISO; freshwater *Chlorella vulgaris*, FCH; *Scenedesmus* sp., SCE; *Selenastrum* sp., SEL.

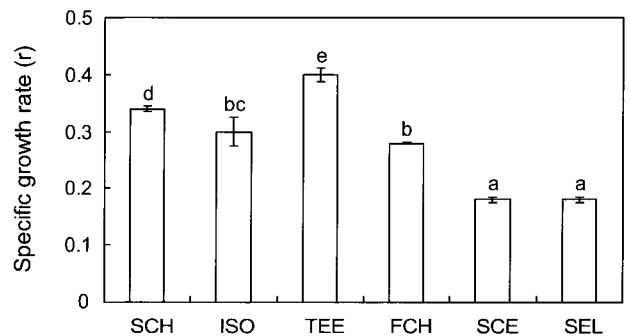


Fig. 2. Specific growth rate of *D. celebensis* fed the different foods; marine *Chlorella ellipsoidea*, SCH; *Isochrysis galbana*, ISO; *Tetraselmis suecica*, TET; freshwater *Chlorella vulgaris*, FCH; *Scenedesmus* sp., SCE; *Selenastrum* sp., SEL.

먹이종류별에 따른 개체배양에서 암컷의 발달단계, 산란수 및 수명 등은 Table 1에 나타내었다. 생식 전 단계는 TET 및 ISO 실험구가 유의적인 차이 없이 가장 빨리 산란을 하는 것으로 나타났다 ($P < 0.05$). 순 생식 단계는 TET 실험구가 19.9일로 유의적으로 산란기간이 가장 길게 나타났다 ($P < 0.05$). 산란수 및 수명의 경우도 TET 실험구에서 각각 56.9개체, 24.3일로 유의적으로 가장 높은 것으로 나타났다 ($P < 0.05$).

Table 1. Reproduction and life span of *D. celebensis* fed the different foods*

Foods ¹	Pre-reproductive phase (day)	Reproductive phase (day)	Offspring (ind.)	Life span (day)
SCH	4.8±0.16 ^b	11.9±0.87 ^a	22.8±0.95 ^a	17.7±0.55 ^a
ISO	3.6±0.16 ^a	13.7±1.39 ^a	24.4±1.71 ^a	18.3±0.59 ^a
TET	3.4±0.26 ^a	19.9±1.99 ^b	56.9±7.18 ^b	24.3±2.37 ^b
FCH	4.5±0.25 ^b	11.6±1.15 ^a	20.0±2.41 ^a	17.1±1.11 ^a

*Values (mean±S.E.) in the same column not sharing a common superscript are significantly different ($P < 0.05$).

¹SCH, marine *Chlorella ellipsoidea*; ISO, *Isochrysis galbana*; TET, *Tetraselmis suecica*; FCH, Freshwater *Chlorella vulgaris*.

*D. celebensis*의 최적 먹이 공급량

먹이인 *T. suecica*의 공급량별에 따른 밀집배양에서 *D. celebensis* 종의 일일 개체변화를 Fig. 3에 나타내었다. 최고밀도는 개체 당 40,000 cells로 공급한 실험구에서 배양 14일째 53.4개체/mL로 유의적으로 가장 높게 나타났다 ($P < 0.05$). 다음으로 개체 당 80,000 및 200,000 cells로 공급한 실험구가 유의적인 차이 없이 43.7개체/mL로 높게 나타났다 ($P < 0.05$).

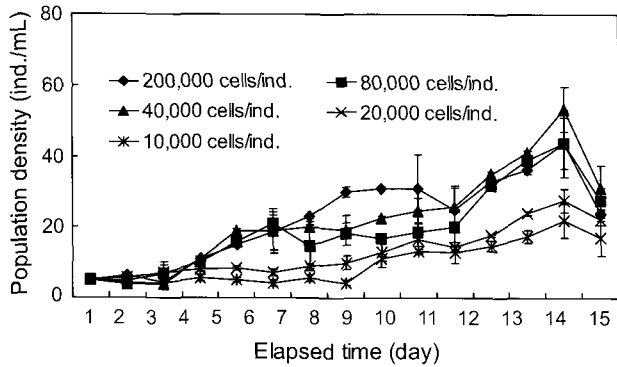


Fig. 3. Population growth of *D. celebensis* at the different food concentrations of *T. suecica*. Vertical bars represent standard errors.

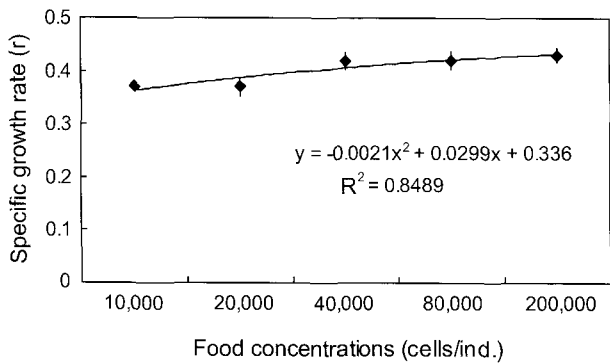


Fig 4. Specific growth rate of *D. celebensis* at the different food concentrations of *T. suecica*. Vertical bars represent standard errors.

반면에 10,000 및 20,000 cells의 공급구는 유의적으로 낮게 나타났다 ($P < 0.05$). 최고밀도에 따른 개체성장률 (r)은 먹이의 공급량이 증가할수록 높아지는 경향을 보여 개체 당 200,000 cells의 공급구에서 0.43으로 가장 높게 나타났다 ($P < 0.05$, Fig. 4). 그러나 40,000 및 80,000 cells 공급구와의 유의적인 차이는 보이지 않았다 ($P > 0.05$).

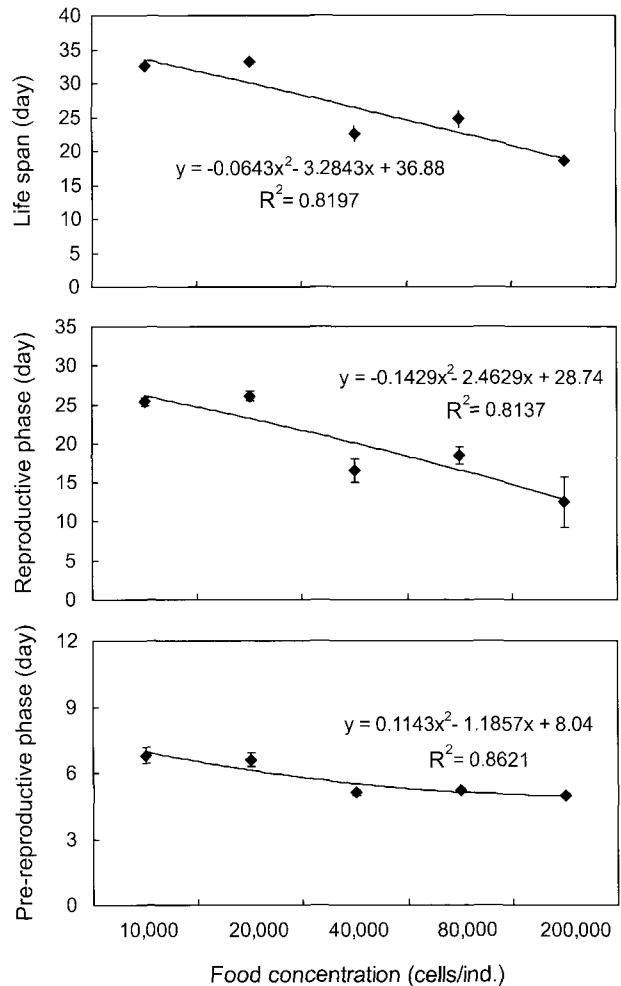


Fig. 5. Reproduction and life span of *D. celebensis* at the different food concentrations of *T. suecica*. Vertical bars represent standard errors.

먹이 공급량에 따른 *D. celebensis*의 개체배양에서 발달단계, 산란수 및 수명 등은 Fig. 5에 나타내었다. 우선 생식 전 단계는 먹이량이 증가할수록 짧아지는 경향을 보여 개체 당 200,000 cells 공급구에서 5.0일로 가장 단시간에 산란을 하였으나, 40,000 및 80,000 cells 공급구와의 유의적인 차이는 보이지 않았다 ($P > 0.05$). 반면 10,000 및 20,000 cells 공급구는 각각 6.8, 6.6일로 유의적인 차이를 보였다 ($P < 0.05$). 순 생식 단계는 먹이의 양이 감소할수록 증가하는 경향을 보여 개체 당 20,000 cells 공급구에서 26.1일로 가장 길게 나타났으나, 10,000 cells 공급구와의 유의적인 차이는 나타나지 않았다

($P>0.05$). 평균 수명도 먹이량이 적을수록 길어져 개체 당 20,000 cells 공급구에서 33.2일로 유의적으로 가장 높게 나타난 반면 ($P<0.05$), 200,000 cells 공급구는 18.5일로 유의적으로 가장 낮게 나타났었다 ($P<0.05$).

한편, 평균 산란수는 개체 당 40,000 cells 공급구에서 38.8개체로 가장 높게 나타났으나 ($P<0.05$), 20,000 및 80,000 cells 공급구와의 유의적인 차이는 보이지 않았다 ($P>0.05$, Fig. 6). 반면 먹이량이 가장 높은 200,000 cells 공급구는 18.7개체로 가장 낮게 나타났었다 ($P<0.05$). 또한 일간 산란수에 있어서도 개체 당 40,000 cells 공급구에서 2.3개체로 가장 높은 값을 보였으나, 먹이량이 가장 낮은 10,000 cells 공급구는 0.8개체로 낮은 값을 나타내었다 ($P<0.05$).

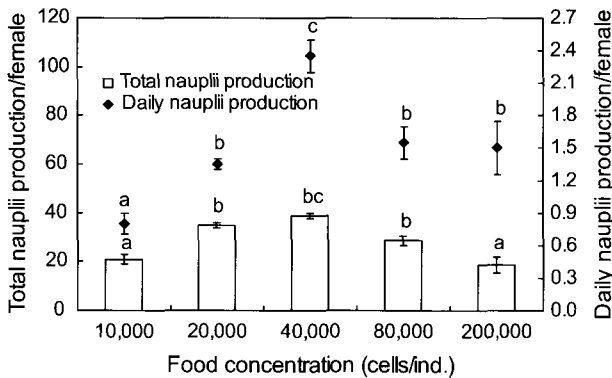


Fig 6. Effects of food concentrations on the daily production and total production of nauplii of *D. celebensis* at 10 psu. Vertical bars represent standard errors.

고찰

본 연구의 먹이종류별 밀집 및 개체배양을 행한 결과, *D. celebensis*의 성장에 있어 가장 우수한 먹이는 *T. suecica* (TET) 인 것으로 나타났다. TET를 이용한 실험구의 경우, 밀집배양 시에는 최고밀도와 개체성장률이 높게 나타났으며, 개체배양 시에는 산란기간, 총 산란수 및 수명 등이 다른 실험구에 비해 높은 것으로 조사되어 *D. celebensis* 종의 최적 먹이생물이라 판단된다. 이러한 결과는 Segawa and Yang (1988)가 *D. aspinosum* (= *D. celebensis*) 종을 배양하기 위한 먹이생물로 *Tetraselmis* sp.가 효과적이라는 연구 자료와 동일하게 나타난 것이다. 그 이외 다른 실험구인 해수산 *C. ellipsoidea* (SCH), *I. galbana* (ISO) 및 담수산 *C. vulgaris* (FCH) 실험구는 TET 실험구에 비해 다소 낮은 성장을 보였으나 대량배양이 아닌 종 보존 수준에서는 *D. celebensis* 종의 보조먹이로서 사용이 가능하리라 판단된다. 다만, SCE 및 SEL 실험구는 모든 반복구에서 전량 폐사하는 것으로 나타나 본 연구 종을 배양함에 있어 부적절한 먹이생물로 조사되었다. 이처럼 각각의 먹이원에 따라 기수산 물벼룩 *D. celebensis*는 서로 다른 성장을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 먹이 내 영양학적인 조건이 각기 달랐기 때문인 것으로 판단된다. 먹이인 식물플랑크톤의 영양이 부족하면 지각류의 성장률 및 생식률은 감소한다는 연구결

과 (Urabe et al., 1997; Ferrão-Filho and Azevedo, 2003)가 있는데, 그 중에서도 필수 고도불포화지방산 (특히, EPA 및 DHA)의 함량이 부족하면 성장이 낮아진다는 다수의 보고들이 있다 (Müller-Navarra, 1995; DeMott and Müller-Navarra, 1997; Joseph et al., 2003). Oka et al. (1982)는 먹이인 식물플랑크톤의 지방산이 *M. macrocopa*에 미치는 역할을 밝힘으로서 그 중요성을 강조하였는데, 그의 연구에 따르면 먹이 내 고도불포화 지방산이 없을 때 *M. macrocopa*는 스트레스를 받아 성장의 저해로 이어진다고 보고하였다. 또한 Kim et al. (2001)에 의하면, *M. macrocopa* 종의 성장에 있어 *Fragilaria* sp.와 *Cryptomonas* sp.는 긍정적인 효과를 보인 반면 남조류인 *Microcystis* sp. 및 *Oscillatoria* sp.는 역으로 강한 억제효과를 나타낸다고 언급하였다. 이러한 차이는 전자 종들은 불포화지방산이 높게 함유된 전형적인 특징을 가진 조류이며, 후자 종인 남조류의 경우는 저온에서 소량의 지방산 합성이 이루어지긴 하나 절대량이 다른 조류에 비해 매우 낮기 때문에 결국 물벼룩의 성장에 긍정적인 효과는 없다고 하였다.

한편, 기존의 많은 연구자들은 이러한 고도불포화지방산 중에서도 특히 EPA의 중요성을 강조하였다 (Brett and Müller-Navarra, 1997; Gulati and DeMott, 1997). Müller-Navarra (1995)의 보고에 의하면, 먹이 내 EPA 함량은 물벼룩인 *Daphnia galeata* 종의 성장률과 매우 밀접한 관계가 있다고 언급하였다. 그렇기 때문에 EPA 함량이 적은 *Scenedesmus obliquus*를 먹이로 공급했을 때 성장률도 낮게 나타난다고 하였다. 또한 Alam et al. (2008)에 의하면, *Moina micrura*에게 가금류의 거름을 공급한 실험구와 *Chlorella*에 빵효모를 혼합하여 공급한 실험구간의 성장을 비교해 본 결과, 물벼룩의 성장은 전자의 먹이에서 더 높게 나타난다고 보고하였다. 이는 거름에 의해 발생된 고도불포화지방산의 함량이 높은 박테리아에 의해 n-3 HUFA의 함량이 증가하였고, 그 중에서도 특히 EPA의 함량이 후자 먹이에 비해 매우 높았기 때문에 개체증가로 이어진 것이라 언급하였다. 아울러, Joseph et al. (2003)은 *Daphnia* 속의 경우, 먹이 내 EPA 함량에 따라 물벼룩의 성장과 알의 생산에 영향을 미친다는 유사한 연구결과를 발표했다. 본 실험에서도 이러한 영향이 작용하여 전체 지방산 함량 중에서 EPA가 5~11%로 비교적 높게 보고 (Reitan et al., 1994, Montaini et al., 1995; Reitan et al., 1997) 되어 있는 TET 실험구에서 좋은 성장을 보인 것이라 판단된다. 물론 *Tetraselmis* sp.는 운동성을 가지고 있는 식물플랑크톤으로서 포식자인 물벼룩이 유영을 하면서 먹이를 접할 빈도가 높았기 때문에 성장에 긍정적인 영향을 주었겠지만 (Salt, 1987; Hotos, 2002), 무엇보다도 먹이 내 EPA 함량에 따른 영향을 직접 받은 것이라 판단되어진다. 왜냐하면 *Tetraselmis* sp.는 비교적 풍부한 EPA 함량과는 달리 DHA의 함량은 0~0.5%로 매우 낮기 때문이다 (Reitan et al., 1997; Lee et al., 2006). 이는 DHA 함량이 0.3%로 낮은 반면 EPA 함량은 13.3~29.5%로 높게 보고 (Hur et al., 1989; Lee et al., 2006) 되고 있는 SCH 실험구에서도 같은 설명이 가능해진다. 다만, SCH의 EPA 함량이 TET의 함량보다 높음에도 불구하고 성장

이 낮았던 것은 *Chlorella*의 두꺼운 세포벽에 의해 영양소의 흡수가 제대로 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단되어진다(Lee et al., 2006).

한편, EPA 함량 (0.7~0.9%)보다 DHA 함량 (11.2~25.7%)이 높게 보고 (Reitan et al., 1997; Nanton and Castell, 1998; Lee et al., 2006) 되고 있는 ISO 실험구에서는 다소 성장이 낮게 나타났는데, 이는 물벼룩이 성장을 함에 있어서 DHA보다 EPA를 더욱 많이 이용했기 때문이라 판단된다. 물론 위에서 언급하였지만 지각류가 정상적인 성장을 위해서는 DHA, EPA와 같은 고도불포화지방산을 요구한다. 하지만 Joseph et al. (2003)의 *Daphnia* sp. 속의 종들도 EPA의 중요성을 보다 더욱 강조하고 있어 이러한 차이가 본 실험에서도 작용한 것이라 판단되어진다. 아울러, 담수산 *C. vulgaris*인 FCH 실험구의 경우도 비교적 낮은 개체밀도를 보였다. 이러한 이유로 담수산 *C. vulgaris*의 경우, 세포 내 18:2n-6 및 18:3n-3의 함량은 전체 함량의 약 40% 차지할 정도로 매우 높은 반면 EPA 및 DHA의 함량은 전혀 발견되지 않는 종으로 알려져 있어 (Brett and Müller-Navarra, 1997; Maruyama et al., 2006), 그에 따른 영양소 결핍문제와 두꺼운 세포벽에 의한 먹이의 섭취가 원활하지 못했기 때문인 것으로 판단되어진다. *Chlorella* sp.의 세포벽은 두꺼운 cellulose로 이루어져 있어 요각류 및 단각류와 같은 미소 갑각류들은 *Chlorella* sp.로 배양을 행하지 않고 있다. 이에 반해 rotifer, *Brachionus* 속의 경우는 peptidoglycanase가 있기 때문에 세포벽이 다량의 peptidoglycan으로 이루어진 *Chlorella* sp.를 쉽게 소화시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Chun et al., 1996). 그러나 본 연구실험에 사용된 *D. celebensis* 종은 *Brachionus* 속에 비해 이러한 분해효소 활성이 매우 적거나 아예 없었기 때문에 담수산 *C. vulgaris*를 제대로 분해할 수 없어서 성장이 낮았던 것으로 판단된다. 다만, 담수산 물벼룩인 *M. macrocopa* 종을 배양할 때에는 일반적으로 담수산 *C. vulgaris*를 먹이로 공급하는 점을 감안한다면 앞으로 이 두 종의 소화 효소적 방법을 이용한 증명이 필요할 것으로 사료된다.

한편, *Scenedesmus* sp. (SCE) 및 *Selenastrum* sp. (SEL) 실험구에서 성장이 좋지 않았던 것은 EPA, DHA 함량의 절대적인 부족현상과 더불어 세포의 형태학적인 문제 때문이라 판단된다. Makulla (2000)에 의하면, *Scenedesmus* sp. 종은 전체 지방산 함량 중에 palmitic acid가 40%로 대부분을 차지하며 EPA는 0.19%로 매우 낮다고 하였다. 또한 Acharya et al. (2005)는 *Scenedesmus* sp. 종에서 DHA는 전혀 발견되지 않는다고 하였다. DeMott (1998)에 의하면, *Scenedesmus vetulus*를 단독 공급했을 때 물벼룩의 성장은 낮았으나, EPA 및 DHA가 높은 *Cryptomonas* sp.을 보충 먹이로 첨가해 줄 경우엔 성장이 증가한다고 보고하였다. 유사한 결과로 Boersma and Vijverberg (1996)는 먹이의 질적 및 양적인 측면에서 *Chlamydomonas* sp.에 비해 *S. vetulus*를 단독 공급해 주었을 때 물벼룩인 *Ceriodaphnia pulchella*의 성장과 생식에 악영향을 준다고 하여 *Scenedesmus* sp. 종을 질적으로 낮게 평가했다. 또한 여러 기존의 연구자들은 먹이의 형태 및 크기도 지각류의 먹이

섭취율과 여과율에 절대적인 영향을 미친다고 보고하였다 (Hessen and van Donk, 1993). 해산 지각류인 *Penilia avirostris* 종은 15 μm 보다 큰 것은 섭취하지 못한다는 보고가 있는데 (Gore, 1980; Turner et al., 1988), 본 실험에 이용된 *Scenedesmus* sp. 종은 현미경하에서 관찰하였을 때 단세포가 여러 개 붙어 있는 군집형이었으며, *Selenastrum* sp.는 별모양으로 이루어진 다소 긴 돌기형태를 띠고 있었다. 이처럼 세포의 형태가 군집형이거나 그 이외 형태를 띤 크기가 큰 모양이라면 지각류의 소화작용을 방해하는 요인으로 작용하게 된다 (Fileto et al., 2004). 본 실험에서도 이러한 형태로 인해 먹이의 비효율적인 섭취로 이어져 동화작용이 제대로 일어나지 못하였거나 또는 먹이를 원활히 소화할 수가 없어서 결국 물벼룩의 성장에 악영향을 미친 것으로 판단되어진다 (Sterner and Schulz, 1998; DeMott et al., 2001).

이상의 결과를 종합해 볼 때, 기수산 물벼룩인 *D. celebensis* 종을 대량배양 하기 위한 최적의 먹이생물은 성장과 생식력이 좋은 *T. suecica* 이라 판단된다.

한편, 지각류에서 일반적으로 먹이의 양이 증가하면 개체 성장률이 향상되고, 성숙기간이 짧아지며, 알의 생산과 함께 암컷 당 산란하는 유생의 수가 증가한다는 보고가 있다 (Duncan, 1989; Vijverberg, 1989; Rose et al., 2000). 즉, 증가된 먹이로 인해 성장과 생식에 보다 많은 에너지를 이용한다는 의미이기도 하다. 그러나 Peters (1987)에 의하면, 먹이량의 증가는 여과율, 여과섭식을 행하는 신체기관의 장애, 과섭취로 인한 소화불량과 먹지 않은 먹이의 침전에 의한 수질악화 등의 문제가 유발되어 오히려 성장을 억제시킨다고 하여 상반된 결과를 보고하였다. 따라서 최대한 성장을 유도하고 유실되는 먹이의 양을 줄여 수질의 안정화를 도모하기 위해선 적정 먹이공급량의 조사가 반드시 필요하다.

Lampert (1977a)는 *Daphnia pulex* 종을 가지고 낮은 먹이 농도에서 성장변화를 측정해 본 결과, 초기 먹이의 여과율은 그래프에서 꾸준히 증가하는 경향을 보이다가 추후 점차 평탄해 지는 형태로 변한다고 하였다. 이 평탄해 지는 시점을 최초의 먹이 제한함량 (incipient limiting level, ILL)이라 언급하였는데, ILL 아래로 먹이의 농도가 더 낮아지게 되면 *Daphnia* sp.의 재생산에 영향을 주게 된다고 보고하였다 (Lampert, 1977b). 또한 개체의 먹이양이 적을 경우에는 대사작용을 진행함에 있어서 점차 체내 중량이 감소한다고 하였다. 이처럼 먹이의 부족으로 인해 체내 중량의 감소가 진행되지 않기 위해서는 최소한의 먹이 농도가 필요하게 되는데, 이를 'threshold food concentration (TFC)'이라 언급하였다 (Lampert, 1977c). 이 농도는 종의 크기마다 다양하며, 이 먹이 농도인 TFC는 배아 후기 발달에 영향을 준다는 연구보고가 있다 (Hardy and Duncan, 1994). TFC는 여과섭식을 행하는 지각류의 성장을 위한 최소한의 먹이 농도이므로 개체 및 군집의 밀도를 결정짓는 요인으로 작용하게 된다 (Lampert, 1977c). 만약 TFC의 개념보다 먹이의 양이 많은 조건이라면 생식 및 성장에 에너지를 균등 있게 분배하여 이용함으로써 원활하게 개체증가가 일어나는 것이다 (Peters, 1987, Duncan, 1989).

이러한 관점에서 본 실험의 최저 실험구는 개체 당 10,000 cells인데, 개체배양을 통한 결과를 보았을 때 분명 생식과 성장이 동시에 일어나는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 본 실험에서는 ILL와 TFC의 개념이 적용되지 않은 것을 의미하므로, 추후 최저 실험구보다도 더 낮은 먹이량을 공급하여 ILL 및 TFC의 조건을 적용해봐야 할 것으로 판단되어진다.

한편, 개체배양에서 최저 먹이 공급구는 생식 전 단계의 시간이 오래 소요되며, 산란수가 적고, 수명은 긴 경향을 보였다. 이는 먹이량이 적은 지각류에서 일반적으로 관찰되는 결과이다. Stuchlíková (1991)에 의하면, 먹이량이 적은 경우에는 먹이의 경쟁 등과 같은 요인이 작용할 수 있기 때문에 보다는 생활사를 위해 섭취한 먹이로부터 아주 효율적인 대사작용을 유도한다고 보고하였다. 또한 Tessier et al. (1983)는 *Daphnia galeata* 및 *D. magna* 종을 가지고 먹이량을 적게 한 뒤 25일 동안 배양한 결과, 비록 생식과 성장에는 다소 부정적이었지만 생존율은 95% 이상이라 보고하여 수명이 긴 경향을 설명하였다. 이는 먹이량의 제한적일 때 최소한의 에너지만 이용하고 필요한 에너지를 저장해 놓으려는 대사작용에 기인된 것이다 (Hrbáková-Esslóva, 1963). 본 실험의 최저 먹이 공급구에서도 이러한 영향이 작용하여 비록 낮은 성장과 생식력을 보였지만 평균 수명은 가장 높게 나타난 것이라 판단되어진다.

한편, 본 실험의 개체배양에서 먹이량이 가장 높았던 개체 당 200,000 cells 공급구는 산란기간, 산란수 및 수명 등의 모든 항목이 다소 낮게 나타났는데, 이는 너무 많은 먹이량에 의한 영향 때문이라 판단된다. 적정 수준보다 초과된 먹이량은 여과섭식을 행하는 기관을 방해하며, 또한 초과 여과섭식 활동은 개체의 내외적으로 스트레스를 주게 됨으로 결국 성장과 생식에 부정적인 영향을 미치기 때문이다 (Peters, 1987).

이상의 결과를 종합해 볼 때, 기수산 물벼룩인 *D. celebensis*의 적정 먹이량은 밀집배양에서 최고밀도와 개체성장률이 높고, 개체배양 시 산란수가 높았던 개체 당 40,000 cells이라고 판단되어진다.

사 사

본 연구는 2009년도 강릉원주대학교 기성회 학술연구조성비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Acharya K, Jack J and Bukaveckas PA. 2005. Dietary effects on life history of riverine *Bosmina*. *Freshwater Biol* 50, 965-975.
- Alam MJ, Ang KJ, Cheah SH, Ambak MA and Saad CR. 2008. Effects of *Moina micrura* (Kurz) from two different culture sources as a replacement of *Artemia* spp. in production of *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) post-larvae. *Aquat Res* 24, 47-56.
- Balasubramanian PR and Bai K. 1994. Utilization of anaerobically digested cattle dung slurry for the culture of zooplankton, *Daphnia similis* Claus (Crustacea: Cladocera). *Asian Fisheries Sci* 7, 67-76.
- Boersma M and Vijverberg J. 1996. Food effects on life history traits and seasonal dynamics of *Ceriodaphnia pulchella*. *Freshwater Biol* 35, 25-34.
- Brett MT and Müller-Navarra DC. 1997. The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic food web processes. *Freshwater Biol* 38, 483-499.
- Chun CZ, Park HG, Hur SB and Kim YT. 1996. Biochemical studies of an endoglucanase from marine rotifer, *Brachionus plicatilis*. *J Aquacult* 9, 453-459.
- DeMott WR and Müller-Navarra DC. 1997. The importance of highly unsaturated fatty acids in zooplankton nutrition: Evidence from experiments with *Daphnia*, a cyanobacterium and lipid emulsions. *Freshwater Biol* 38, 649-664.
- DeMott WR, Gulati RD and van Donk E. 2001. Effects of dietary phosphorus deficiency on the abundance, phosphorus balance, and growth of *Daphnia cucullata* in three hypereutrophic Dutch lakes. *Limnol. Oceanogr* 46, 1871-1880.
- DeMott WR. 1998. Utilization of a cyanobacterium and a phosphorus deficient green alga as complementary resources by Daphnids. *Ecology* 79, 2463-2481.
- Ducan DB. 1955. Multiple-range and multiple F tests. *Biometrics* 11, 1-42.
- Duncan, A., 1989. Food limitation and body size in the life cycles of planktonic rotifers and cladocerans. *Hydrobiologia* 186/187, 11-28.
- Ferrão-Filho A and Azevedo S. 2003. Effects of unicellular and colonial forms of *Microcystis aeruginosa* from laboratory cultures and natural populations on two tropical cladocerans. *Aquatic Ecol* 37, 23-35.
- Fileto C, Arcifa MS, Ferrão-Filho AS and Silva LHS. 2004. Influence of phytoplankton fractions on growth and reproduction of tropical cladocerans. *Aquatic Ecol* 38, 503-514.
- Gore MA. 1980. Feeding experiments on *Penilia avirostris* Dana (Cladocera: Crustacea). *J Exp Mar Biol Ecol* 44, 253-260.
- Gulati RD and DeMott WR. 1997. The role of food quality for zooplankton: Remarks on the state-of-art, perspectives and priorities. *Freshwater Biol* 38, 753-768.
- Hardy ER and Duncan A. 1994. Food concentration and temperature effects on life cycle characteristics of tropical Cladocera (*Daphnia gessneri* Herbst, *Diaphanosoma sarsi* Richard, *Moina reticulata* (Daday): I Development time. *Acta Amaz* 24,

- 119-134.
- Hessen DO and van Donk E. 1993. Morphological changes in *Scenedesmus* induced by substances released from *Daphnia*. Arch Hydrobiol 127, 129-140.
- Hotos GN. 2002. Selectivity of the rotifer *Brachionus plicatilis* fed mixtures of algal species with various cell volumes and cell densities. Aquat Res 33, 949-957.
- Hrbackova-Esslova M. 1963. The development of three species of *Daphnia* in the surface water of the Slapy Reservoir. Int Rev Ges Hydrobiol 48, 325-333.
- Hur SB, Lee CK and Lee EH. 1989. Selection of suitable phyto-food organisms for the rotifer, *Brachionus plicatilis* cultivation in high and low water temperature seasons. J Aquacult 2, 91-106.
- Joseph LR, Müller-Navarra DC and Brett MT. 2003. A test of the role of polyunsaturated fatty acids in phytoplankton food quality for *Daphnia* using liposome supplementation. Limnol Oceanogr 48, 1938-1947.
- Kim BH, Choi MK and Takamura N. 2001. Dietary contributions of phytoplankton and zooplankton to young silver carps. Kor J Limnol 34, 98-105.
- Kumar R and Hwang JS. 2008. Ontogenetic shifts in the ability of the Cladoceran, *Moina macrocopa* Straus and *Ceriodaphnia cornuta* Sars to utilize ciliated protists as food source. Int Rev Hydrobiol 93, 284-296.
- Lampert W. 1977a. II. The dependence of carbon assimilation on animal size, temperature, food concentration and diet species. Arch Hydrobiol Suppl 48, 310-335.
- Lampert W. 1977b. III. Production and production efficiency. Arch Hydrobiol Suppl 48, 336-360.
- Lampert W. 1977c. IV. Determination of the "threshold" concentration as a factor controlling the abundance of zooplankton species. Arch Hydrobiol Suppl 48, 361-368.
- Lee KW, Park HG, Lee SM and Kang HK. 2006. Effects of diets on the growth of the brackish water cyclopoid copepod *Paracyclops nana* Smirnov. Aquaculture 256, 346-353.
- Makulla A. 2000. Fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus*: Correlation to dilution rates. Limnologica 30, 162-168.
- Martínez-Jerónimo F and Gutiérrez-Valdivia A. 1991. Fecundity, reproduction and growth of *Moina macrocopa* fed different algae. Hydrobiologia 222, 45-55.
- Maruyama I, Yamamoto S, Hayashi M and Murata O. 2006. Rotifers fed with n-3 highly unsaturated fatty acid-enriched *Chlorella vulgaris* are suitable for the rearing of larval red sea bream *Pagrus major*. Aquacult Sci 54, 229-230.
- Montainia E, Chini Zittellia G, Tredicia MR, Molina Grima E, Fernández Sevilla JM and Sánchez Pérez JA. 1995. Long-term preservation of *Tetraselmis suecica*: influence of storage on viability and fatty acid profile. Aquaculture 134, 81-90.
- Müller-Navarra DC. 1995. Evidence that a highly unsaturated fatty acid limits *Daphnia* growth in nature. Arch Hydrobiol 132, 297-307.
- Nandini S and Sarma SSS. 2000. Lifetable demography of four cladoceran species in relation to algal food (*Chlorella vulgaris*) density. Hydrobiologia 435, 117-126.
- Nanton DA and Castell JD. 1998. The effects of dietary fatty acids on the fatty acid composition of the harpacticoid copepod, *Tisbe* sp., for use as a live food for marine fish. Aquaculture 163, 249-259.
- Oka A, Suzuki N and Watanabe T. 1982. Effect of fatty acids in *Moina* on the fatty acid composition of larval ayu *Plecoglossus altivelis*. Bull Jap Soc Sci Fish 48, 1159-1162.
- Park HG, Lee KW and Kim SK. 1999. Growth of rotifer by the air, oxygen gas-supplied and the pH adjusted productive of the high density culture. J Kor Fish Soc 32, 757-784.
- Peters RH. 1987. Metabolism in *Daphnia*. In: *Daphnia*. Peters RH and de Bernardi R. eds. Mem Ist Ital Idrobiol 45, 193-243.
- Reitan KI, Rainuzzo JR and Olsen Y. 1994. Influence of lipid composition of live feed on growth, survival and pigmentation of turbot larvae. Aquacult Int 2, 33-48.
- Reitan KI, Rainuzzo JR, Øie G and Olsen Y. 1997. A review of the nutritional effects of algae in marine fish larvae. Aquaculture 155, 207-221.
- Rico-Martínez R and Dodson SI. 1992. Culture of the rotifer, *Brachionus calyciflorus* Pallas. Aquaculture 105, 191-199.
- Rose RM, Warne MS and LIM RP. 2000. Life history responses of the cladoceran *Ceriodaphnia* cf. *dubia* to variation in food concentration. Hydrobiologia 427, 59-64.
- Salt GW. 1987. The components of feeding behavior in rotifers. Hydrobiologia 147, 271-281.
- Segawa S and Yang WT. 1988. Population, growth and density of an estuarine cladoceran *Diaphanosoma*

- aspinosum* in laboratory culture. Bull Plankton Soc Japan 35, 67-73.
- Sterner RW and Schulz KL. 1998. Zooplankton nutrition: Recent progress and a reality check. Aquat Ecol 32, 261-279.
- Stuchlíková Z. 1991. Effect of previous feeding conditions on survival in *Daphnia pulex* (Crustacea: Cladocera). Hydrobiologia 225, 177-183.
- Tessier AJ, Henry LL, Goulden CE and Durand MW. 1983. Starvation in *Daphnia*: energy reserves and reproductive allocation. Limnol Oceanogr 28, 667-676.
- Turner JT. 1988. The marine cladoceran *Penilia avirostris* and the "microbial loop" of pelagic food webs. Limnol Oceanogr 33, 245-255.
- Urabe J and Watanabe Y. 1991. Effect of food condition on the bacterial feeding of *Daphnia galeata*. Hydrobiologia 25, 121-128.
- Urabe J, Clasen J and Sterner RW. 1997. Phosphorus-limitation in *Daphnia* growth: Is it real?. Limnol Oceanogr 42, 1436-1443.
- Ventura RF and Enderez EM. 1980. Preliminary studies on *Moina* sp. production in freshwater tanks. Aquaculture 21, 93-96.
- Vijverberg J. 1989. Culture techniques for studies on the growth, development and reproduction of copepods and cladocerans under laboratory and in situ conditions: A review. Freshwater Biol 21, 317-373.
- Yoshimatsu T, Imoto H, Hayashi M, Toda K and Yoshimura K. 1997. Preliminary results in improving essential fatty acids enrichment of rotifer cultured in high density. Hydrobiologia 358, 153-157.
- Zhang DM, Yoshimatsu T and Furuse M. 2006. The presence of endogenous L-carnitine in live foods used for larviculture. Aquaculture 255, 272-278.

2010년 2월 5일 접수

2010년 4월 2일 수정

2010년 4월 12일 수리