

# 양식어류의 유전능력 개량 (Genetic improvement of aquaculture species)



홍경표 선임연구원  
한국해양연구원  
Tel) 031-400-6232  
E-mail) kphong@kordi.re.kr

## 서론

20세기 중반까지도 수산물에 대한 수요의 급증과 함께 어로 기술과 장비의 비약적인 발달에 힘입어 원근해를 가리지 않고 어획량 증대에 초점이 맞추어져 왔다. 이러한 추세는 결국 수산자원의 남획으로 이어졌고, 산업화에 따른 수해양의 오염과, 지구 온난화에 따른 생태계 변동 등의 요인들과 맞물려 수산자원은 감소 일로의 길을 걸어왔다. 따라서 수산물 수요의 증가에 대응하기 위해서 수산물도 집약적인 관리를 통한 공급 증가의 필요성이 증대되기 시작하였다. 이에 지난 수십년간 어류를 비롯한 수생 동식물을 생산, 사육하는 양식산업은 괄목할만한 성장을 하여왔다. 그러나, 양식산업은 우리에게 익숙한 대부분의 동식물이 우리 인간과 마찬가지로 육상에서 대기 중의 공기를 이용하는 반면 수생 동식물은 말 그대로 생활 터전이 물속이라는 특수성이 있기 때문에 접근과 관리 자체에 많은 제약이 따른다. 그러한 여러 가지 제약으로 인해 육상 동식물의 사육에 비해 어려움이 많으며 따라서 상대적으로 발전 속도도 더딘 것이 사실이다.

최근 세계적으로 인류의 식량부족으로 인한 미래의 위기에 대비하기 위해 세계 각국에서는 자기 나라의 식량자원 확보를 위해 막대한 투자를 하고 있으며, 앞으로 닥칠 국제적 식량 무기화의 시대에 대비하고 있다. 우리나라의 경우 삼면이 미래 식량자원의 보고인 바다로 둘러싸인 해양 국가이나, 지난 수십 년간 남획에 의해 자연의 수산 자원은 급격히 고갈되어가고 있으며, 해양환경 오염과 기후변화로 인한 자원의 감소, 변동 등은 미래의 안정적 수산물 공급을 위협하고 있다. 게다가 바다를 접하고 있는 나라들은 각각 자기 나라의 200해리 경제수역을 설정하여 자기 다른 나라 어선의 자국 해역내 조업을 금지하고 있어 우리나라의 원양어업은 급격히 쇠퇴하였으며, 어업에 의한 수산물의 생산도 급격히 감소하고 있다. 이로 인해 최근 우리나라의 인접국가인 일본 및 중국, 러시아 등과 어업권 분쟁이 계속 발생하고 있는 것이다. 수산물 수요는 점차 증대되어 가는 반면에 자연의 수산자원은 줄어만 가는 현실을 극복하기 위해서는 양식에 의한 수산물 공급 증대밖에는 대안이 없는 듯하다.

농업, 축산업 등과 마찬가지로 양식산업도 대상

생물의 종류에 따라 각각 알맞은 사육 기술이 필요하며, 상당한 시간과 노력, 그리고 비용을 지불해야만 한다는 공통점이 있으며 고비용, 저효율이라는 산업적 한계를 극복하여야만 한다. 게다가 최근에는 세계적인 수입 자유화 압력에 노출되어 이제는 품질과 가격 등 모든 면에서 양식 생물도 국제적 경쟁력을 확보하지 못하면 양식산업 자체의 붕괴가 우려되는 상황에 직면하고 있다.

1990년 세계 양식 생산량은 약 1,500만톤이며 2025년에는 약 6,200만톤의 수요가 예상되는데, 이같이 증가하는 수산물 수요와 감소하는 공급의 gap을 메우고 동시에 경쟁력을 확보하기 위해서는 현재의 양식산업의 생산성을 획기적으로 증대시키지 않으면 안된다. 지금까지 좀더 효율적으로 양식생물을 사육하기 위한 첨단 시설이 개발되어 왔으며, 과학적 사육·관리기술이 계속 개발되고는 있지만, 대상생물 자체의 생산능력을 향상시키는 데에는 한계가 있다. 그러한 한계를 극복하기 위해서 양식생물의 잠재적인 유전 능력을 개량하여 생산성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다. 양식어류에 대한 유전능력 개량을 통해 연간 약 4.74%의 생산성 증대를 가져올 수 있어 상기의 공급 부족량을 충족시킬 수 있을 것으로 예상되고 있다 (Gjedrem, 1997).

이에 여기서는 양식생물에 대한 유전능력 개량 연구의 필요성, 방법, 사례, 그리고 생명공학 기술을 활용한 유전능력 개량 방법 등을 간단히 소개하고자 한다.

### 양식생물의 유전능력 개량의 필요성

세계적으로 양식산업에 있어서 생산성과 경쟁력을 높이기 위하여 여러 방면의 유전학적 연구를 진행하여 왔다. 그 이유는 유전능력개량 프로

그램 (genetic program)은 다양한 개의 품종에서 보듯이 주어진 목표나 환경에 적합한 동물을 만들어낼 힘을 가지고 있기 때문이다. 이러한 genetic program은 여러 가지 이익을 가져오는데 대부분 경제적 이익으로 귀착된다. 생산성의 증대와 양식 생물에 대한 신뢰도의 향상은 결국 소비자의 이익과 안정적 양식산업의 발전을 도모하게 되는 것이다. 또한 경쟁력의 증대는 경제적 이익과 양식업체의 생존과 직결된다. 또한 genetic program은 현재와 미래의 어류 질병으로 인한 폐사의 위협에 대한 해결책을 제공할 것으로 기대된다. 경제적 투자효과 측면에서도 genetic program의 투자에 대한 이익이 매우 큰 편인데, 연간투자비용/이익 (cost/benefit ratio)이 대서양연어의 경우 1:15에 달하는 것으로 알려져 있다 (Gjedrem, 1997). 그러나 잘 계획된 genetic program을 통해서만 양식 어류집단의 유전능력 개량이 가능하다. 유전적 개량의 목표는 현재 주로 성장에만 초점을 맞추고 있지만, 항병성 (disease resistance), 외형 (appearance), 생존율 (survial) 등의 형질들을 개량의 목표로 삼을 수 있다.

양식생물 자체가 지니고 있는 고유의 잠재적 유전능력을 개량하여 양식산업의 효율을 높이기 위한 전통적인 최선의 방법으로 선발육종 (selective breeding)이 있다. 선발육종은 기존의 양식 집단 내에서 특별히 능력이 우수한 유전자를 지닌 개체 혹은 집단을 선발하여 후손을 생산함으로써 전체 양식 군의 능력을 개량해 가는 유전육종학적 기술이다. 선발에 의한 지속적 능력 개량의 제일 전제조건은 상가적 유전자 효과의 변이 (the presence of additive genetic variation)이다. 따라서 거의 모든 선발육종 프로젝트는 경제형질에 대한 유전모수의 추정으로부터 시작된다. 즉 통계학적

방법에 의해 유전율 (heritability) 등 유전적 모수 (genetic parameter)를 추정하여, 선발육종의 타당성을 확인하고, 계획적 선발에 의해 점진적으로 양식어류 집단의 생산성을 높여가는 것이다. 선발에 의한 양식 집단의 유전적 개량량 (genetic progress,  $\Delta G$ )은 세대를 반복할수록 누적적으로 축적되므로 지속적이고도 점진적으로 개량 효과를 증대시켜 갈 수 있다는 특징이 있다.

지금까지 어류 양식의 생산성을 높이기 위한 노력은 주로 사육환경 및 사육기술의 개선에 치중되어 왔다. 이는 대상생물의 생산성을 높이는 데 크게 기여하여 온 것은 사실이나 그 효과는 한 세대에만 국한되는 것으로 그 자체만으로는 지속적으로 양식 어류집단의 생산성을 높여갈 수는 없다. 우리 나라의 경우, 1980년대 이후 무지개송어를 비롯한 넙치, 조피볼락 등을 대상으로 활발하게 양식산업이 발전하여 왔으나, 그 동안 양식어류 집단의 생산능력 향상을 위한 노력을 경주하지 않았으며, 오히려 육종에 대한 인식부족으로 인하여 무계획적인 근친교배를 거듭하여 결국 양식 어류집단의 생산능력 저하 (inbreeding depression) 등으로 경쟁력을 상실하여 국내 전체 양식산업에 위기를 자초하고 말았다. 이에 비해 선진국에서는 연어류 등 일부 어류에 대하여 유전적 개량을 위한 선발육종 기술을 일찍이 도입하여 유전적 개량에 의해 양식 생산성을 극대화하여 최소의 비용과 노력으로 최대의 생산량을 획득함으로써 경영의 합리화를 이루어가고 있다.

세계적으로 어류의 선발육종 연구는 주로 잉어, 차벨매기, 연어류, 그리고 틸라피아등을 대상으로 이루어져 왔다. 모든 생물의 표현형은 유전과 환경, 그리고 이들간의 상호작용에 의해 좌우된다. 어류는 거의 대부분 체외수정을 하며 포유

류와 같은 육상의 고등동물에 비하여 서식 공간의 특성상 환경효과의 추정 자체가 어렵기 때문에 유전효과를 정확히 추정하기란 그리 쉬운 일이 아니다. 또한 개체식별 및 관리가 어렵고 인위적인 계획교배에도 상당한 어려움이 있으며, 대부분의 양식대상 어종은 세대간격 (generation interval)이 보통 2~3년 정도로 비교적 길고, 산란 계절도 한정되어 연중 종묘생산을 할 수가 없는 점 등이 지금까지 어류의 육종연구에 큰 제약으로 여겨져 온 것이 사실이다. 또한 이들의 생활터전이 수중이라는 특수성 때문에 안정적인 실험을 위한 유지 관리가 어려운 단점이 있어서 쉽게 접근하기가 힘든 면도 있다. 그러나 근래에 들어 이들 생물에 대한 인위적 관리기술이 발전을 거듭하고 있어 수산생물의 유전연구에 많은 도움을 주고 있다. 또한, 대부분의 어류의 경우 일회 산란수가 많아서 선발강도 (intensity of selection)를 크게 하여 유전적 개량량을 증대시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한 일부 어종은 연중 수회에 걸쳐 산란을 하는 경우도 있어서 비교적 단기간 내에 유전적 생산능력을 향상시킬 수가 있다.

실제로 선발육종을 하기 위해서는 먼저 육종사업의 필요성을 충분히 검토하고 어떤 형질을 개량할 것인지를 결정하여야만 한다. 일반적으로 한가지 형질에 대한 유전적 개량은 예기치 않은 다른 형질에도 영향을 미치게 되므로 선발의 목표를 설정하는데도 기초 연구를 통한 세심한 주의가 필요하다. 일단 선발의 목표가 정해지면 어떻게 그 표현형을 정확하게 측정할 것인지, 어떠한 선발법을 적용할 것인지 등의 방법을 결정하여야 한다.

다음은 유전능력 개량을 위한 선발육종 사업의 경제성 검토시 반드시 고려하는 사항이다.

- 선발의 최종목표 (Goal of selection)
- 선발의 정확도 (accuracy of selection)
- 선발강도 (selection intensity)
- 시장성 (value of market)
- 대상 생물의 번식특성 (reproductive constraints)
- 관리기술특성 (technical constraints)
- 육종사업비 대비 유전적 개량량 (cost of the program relative to genetic gain)
- 개량 대상 양식 집단의 근친정도
- 경제형질의 유전율 및 유전상관
- 육종사업 추진 주체 (정부, 민간 등)

위에서 열거한 사항들은 양식어류에 대한 선발 육종 사업의 타당성 검토를 위해 반드시 필요할 뿐만 아니라, 양식산업에 있어서 효율적 경영을 위한 필수적인 자료를 제공한다.

### 양식어류의 능력개량 방법 및 사례

양식어류 품종에 따라서 다소 차이는 있겠지만 여기서는 선발효과 (selection response)를 극대화하기 위한 일반적인 방법을 소개하기로 한다. 단, 앞에서 설명한 필수 고려 사항 및 타당성 검토가 사전에 이루어져야 함은 물론이다.

- 1) 선발은 주어진 양식장 환경 하에서 실시하여야 한다.
- 2) 암컷과 수컷을 구분하여 선발하여야 한다. 예를 들면 참돔은 응성선숙자웅동체 (protandrous hermaphrodites)이며 대부분의 개체는 약 1.5세까지는 수컷이며 그 후 상당수가 암컷으로 바뀐다. 일반적으로 성성숙기에 암컷은 수컷보다 크다. 성에 따른 형태차이의 원

인이 무엇이든 간에 암컷과 수컷은 각각 다른 호르몬 환경을 가지게 된다. 따라서, 암컷의 성장에 대한 선발, 즉, 가장 큰 것을 선발하는 것은 수컷 자손의 성장에 관련된 반응을 야기할 수 있다는 것이다.

- 3) 동일한 연령 또는 일령의 집단 내에서 선발하여야 한다. 다시 말하면, 연령이 각각 다른 개체들이 섞여 있을 경우 표현형 변이에 환경효과를 증대시키게 되어, 유전율과 선발효과를 감소시킨다. 양식 참돔에 대한 선발은 24~48시간 이내에 산란하는 집단에서 실시하는 것이 좋다. 다시 말해서 환경과 같은 비유전적 표현형 변이의 요소를 줄이면 유전율과 선발의 정확도 및 선발효과를 증대시킬 수 있게 한다.
- 4) 선발 기준에 대한 정확한 측정이 요구된다. 즉, 내병성에 대한 선발의 경우도 병원균의 동정뿐만 아니라, 숙주내 병원균의 역가를 정량화 할 필요가 있다는 점이다.
- 5) 집단의 혈통에 대한 유전정보 및 대상형질 표현형에 대한 정보가 필요하다.
- 6) 근친계수를 최소화 하여야 한다. 한 세대에서의 근친계수의 증가는 유효집단의 크기와 반비례한다 ( $\Delta F=1/2N_e$ ). 또한 세대를 거듭하면서 근친계수가 축적되므로 t-generation에 있어서의 근친계수는  $F=1-(1-\Delta F)^t$ 가 된다. 근친에 의한 능력 저하 (inbreeding depression)는 외교배 평균 (outbred mean)과 비교할 때 근친계수가 1% 증가하면 0.5%의 depression을 가져올 수 있다. 또한, inbreeding depression은 선발반응을 지연시킨다. 돌류에서의 유효집단 크기는 10%정도 이다. 이 때, 선발강도가 너무 높으면 유효집단의

크기 ( $N_t$ )를 감소시켜서 적절한 규모의 친어군 (broodstock)을 유지하기가 어렵다.

- 7) 유전자의 다면발현 (pleiotropism), 유전상관 (genetic correlations) 등으로 인해 예기치 않은 계도 선발 대상이 아닌 다른 형질에 영향을 줄 수 있으므로 관련 있는 형질의 선발 반응을 관찰하여야 한다.

이러한 기본적인 선발육종 방법에 따라서 우리나라와 일본에서 고가의 양식 어종으로 각광을 받고 있는 참돔 선발육종의 성공적인 예를 들어 보기로 한다. 일본에서는 1965년경부터 양식을 하기 시작하였는데, 어획량이 감소하자 종묘생산을 통한 양식의 중요성이 급격히 부각되었다. 그 후 참돔양식은 발전을 거듭한 결과 앞으로 상업적 생산을 위해 바람직한 방향으로 특정 형질에 대한 선발이 필요한 단계에 이르렀다. 일본은 참돔 선발육종 시작 이후 1995년까지 8번째 세대 (G VIII) 선발을 마쳤으며, 네 번째 세대 (G IV) 이후 속성장 종묘를 생산하고 있다. 그들의 개량사업 결과 4세어 개량집단의 평균체중은 1972년에 2,000g 이었으나 1994년 (약 7세대 경과)에는 5,009g으로 2.5배의 증가를 보였으며, 1kg의 상품 크기에 도달하는 시간은 자연산이 평균 1,000일이 소요되나 7세대의 선발 결과 740일 정도로 단축되었다. 이는 종묘 크기가 6~8cm로 볼 때 종묘 입식 후 1년 7개월 정도면 상품 출하가 가능함을 의미한다. 한편 그 당시까지만 해도 양식어류 선발육종의 산업적 이용 연구는 주로 담수어류를 대상으로만 이루어져 왔는데, 일본의 사례를 통해 해산어에 대한 유전적 개량이 가능함을 볼 수 있다. 최근 1998년 이후 우리나라에서도 해산어 선발육종을 시도하고 있으나 시작 단계이

며, 그나마 아직까지도 장기적 계획이 수립되어 있지 못한 상태이다.

## 생명공학 기법을 이용한 양식생물의 유전적 개량

1980년대 이후 어류 육종 기술 개발의 일환으로 염색체공학적 배수체 유도 기술이 도입되었는데, 이는 세포의 분열을 억제시켜서 염색체의 수를 증가시키거나 양친 중 어느 한쪽 성만의 유전물질만 유전시키는 자성 (웅성) 발생성 이배체 유도, 3배체 또는 4배체 어류 유도기술 등이 응용되었으나 아직 산업적 적용은 불가능한 실정이다. 그 이후 근래에 들어 생명공학 기술이 발전하면서 미국, 캐나다 등에서는 대서양 연어에 외래 유전자 (성장호르몬)를 주입하여 이른바 유전자 변형 어류 (GMO, genetically modified organism) 생산에 성공한 바 있으나, GMO에 대한 전 세계적인 규제 및 소비자들의 외면으로 상용화하는 데는 많은 어려움이 산재해 있다. 우리나라에서도 미꾸라지를 대상으로 외래 성장호르몬 유전자를 이식한 GMO 유도에는 성공한 바 있으나, 역시 산업화시키지는 못하였다.

수산 동식물에 대한 이러한 GMO의 생산은 육상과는 달리 대상 생물의 생활 터전이 바다를 비롯한 수중이므로 예기치 않은 유전자의 자연으로의 유출로 자연 생태계에 엄청난 충격을 야기시킬 수 있다는 점에서 엄격한 통제와 각별한 연구자의 주의가 필요하다. 또한 식품으로서 수산물의 소비자인 현대인들의 GMO 식품에 대한 거부감 증대 경향 등을 감안하면 GMO 수산물의 양식은 산업화에 한계가 있을 것으로 예상된다.

이러한 이유로 선발육종은 고전적이면서도 안정적으로 양식생물의 유전적 생산능력을 향상시

킬 수 있는 유일한 대안으로 꼽을 수가 있는 것이다. 그러나 양식어류의 생산성과 관련이 깊은 양적형질 (quantitative traits)에 대한 선발육종은 질적형질보다 훨씬 어렵고 복잡하며 많은 시간을 요한다. 실제로 선발육종은 정해진 완료 시점이 없으며 지속적으로 꾸준하게 유전적 개량 효과를 축적하게 된다. 그러나 선발을 중단하게 되면 그 집단은 그동안 이룩해온 개량효과를 잃게 되고 만다. 선발육종을 하기 위해서는 대상 집단의 기록을 체계적으로 관리하여야 하며 또한 그러한 기록을 통계적으로 분석하는 기술이 필요하다. 선발육종은 노력한 만큼 대가를 기대할 수 있는 확실한 유전적 개량 방법이지만 소기의 목적 달성을 위해서는 많은 수조와 노력, 비용, 그리고 기록의 관리가 필수적이다. 또한 장기적 안목의 계획 수립 (최소한 10년 이상)과 인내심을 필요로 한다. 이러한 전제 조건을 무시한 즉흥적이고 단기적인 선발육종은 아무런 의미가 없다.

희망적인 것은 최근 생명공학 기술을 선발육종에 적용하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진

행되고 있는데, 그것이 바로 유전자 표식에 의한 선발 (MAS, marker assisted selection) 기술의 개발이다. 이는 지금까지의 선발의 기준은 양식 생물집단 내에서 생물 개체의 표현형 (phenotype)이 통계유전학적 방법에 의해 선발의 기준이 되어 특정 수준 이상의 우수한 개체 또는 가계 등을 선발하여 후손을 생산하였지만, MAS를 이용하게 되면 우수한 표현형을 나타내는 유전자를 가지고 있는 개체만을 선발하면 되므로 선발의 정확도를 획기적으로 높일 수 있어 선발에 의한 유전적 개량효과를 극대화 할 수 있다. 가까운 장래에 주요 양식 어류의 MAS 기술이 실용화 될 것으로 기대되며, 고효율적 양식을 통하여 미래 수산물 수요가 충족될 것이다.

## 참 고 문 헌

- Gjedrem, T., 1997. Selective breeding to improve aquaculture production. *World Aquaculture*, 28(1):33-45.