

우리나라 넙치 육종연구에 관한 현황 및 고찰

Current Status and Consideration of Breeding Research on Olive Flounder in Korea

박종원¹

Jong Won Park
국립수산과학원
육종연구센터

이정호¹

Jeong Ho Lee
국립수산과학원
육종연구센터

김현철^{1*}

Hyun Chul Kim
국립수산과학원
육종연구센터

¹ Genetics and Breeding Research Center, National Institute of Fisheries Science, Geoje 53334, Korea

ABSTRACT

It was in the 1982 that artificial seed production research for olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) farming was first conducted in Korea (Currently, National Institute of Fisheries Science, Fish Breeding Research Center). In 1985, fertilized eggs were obtained from natural olive flounder adapted to land tanks, and artificial seed production technology was established and fertilized eggs were distributed. In the late 1980s, halibut aquaculture began to prosper in land-based tank farming in Jeju Island and Busan's Gijang region, where water temperatures are relatively high in winter. Currently, aquaculture is being carried out all over the country, centering on Jeju Island and Wando, Jeollanam-do. However, olive flounder farming, which started with a small group in the 1980s, reduced genetic diversity through inbreeding over generations, resulting in side effects such as slow growth, reduced resistance to disease and environmental conditions. In order to solve these genetic problems of farmed olive flounder in Korea, the Fish Breeding Research Center of the National Institute of Fisheries Science introduced a wild-caught parent fish group to the existing aquaculture group from 2003 to 2004. Genetic diversity was secured and KingNupchi with fast growth and improved body shape was developed. In this study, the current status of breeding technology development of olive flounder, a major aquaculture breed in Korea, is reviewed and future research directions are suggested.

Key Words : Genetic parameter, Heritability, Growth traits, Selection, Olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)

Received Sep. 11. 2023
Revised Oct. 13. 2023
Accept Oct. 27. 2023

*Correspondence
Hyun Chul Kim
E-mail : hckimgnu@korea.kr

서론

세계적인 경제성장과 더불어 수산물의 수요는 점차 증가하고 있으나, 최근 어업자원 감소로 인한 수산물의 안정적

인 공급이 힘들어지고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위해 서 기르는 어업인 양식산업은 지속적인 발전이 요구되고 있다. 그러나 지구 온난화 등 기후 변화에 따른 양식 환경의 급격한 변화와 빈번하고 복합적으로 발생하는 질병의 영향



으로 양식산업은 심각한 위기에 처해 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 양식 기술의 개발, 사육시설의 개선, 양질의 배합사료 개발, 백신 개발 등 여러 가지 연구개발이 필요하지만, 무엇보다도 근본적인 해결책은 육종기술 개발을 통한 빠른 성장, 질병 내성, 환경 내성 등 우량품종을 개발하는 것이다.

우리나라의 수산 종자 연구개발은 1970년대 양식용 종자의 생산기술(자연채집과 인공 생산) 개발에서 시작하여 2000년대에 들어오면서 '품종개량' 또는 '육종'으로 변화 발전되었다. 특히, 선발육종에 의한 품종개량은 획기적으로 양식 생산성을 향상할 뿐만 아니라, 별도의 유전자 조작 없이 세대를 거듭할수록 지속해서 유전적 개량이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

해외의 대표적인 육종 성공 사례로 양식 선진국인 노르웨이의 대서양연어를 들 수 있다. 노르웨이는 1968년부터 정부 주도로 체계적인 육종프로그램을 통해 대서양연어 품종 개량을 성공적으로 해왔고 현재는 전 세계 연어 시장의 80%를 차지하고 있다. 대서양연어를 대상으로 다양한 연구(Jonsson et al., 1994; Duncan et al., 1998; Endal et al., 2000; Sonesson et al., 2013; Panya et al., 2017; Davidson et al., 2021)와 품종 개량이 꾸준히 진행되어 왔으며, 최근에는 양적형질유전자좌(Quantitative Trait Locus; QTL) 선발과 유전체 선발(Genomic selection)을 통하여 기생충성 질병을 일으키는 바다 이(sea lice)에 내병성이 있는 종자 개발에 성공하였다.

우리나라의 경우 국내에서 유일한 수산동물의 육종에 관한 국가 연구기관인 '국립수산과학원 육종연구센터(경상남도 거제시 소재)'에서는 유전자 표지를 이용한 친자확인 기술을 이용해 국내 주요 양식어종인 넙치, 전복, 참돔 등을 대상으로 육종연구를 추진하고 있다.

특히, 넙치(*Paralichthys olivaceus*)는 우리나라 해면양식 어류 생산량의 약 50%를 차지할 뿐만 아니라, 국민 횡감으로 소비량도 높은 대표적인 어종이다. 넙치양식을 위한 인공종묘 생산 연구가 처음 이루어진 곳은 1982년 국립수산진흥원 거제수산종묘시험장(現 국립수산과학원 육종연구센터)이다. 1985년 육상수조에 적응시킨 자연산 넙치로부터 자연산란을 유도하여 수정란을 확보하였고 인공종자 생산기술을 확립하였으며, 수정란을 보급하였다. 그러나, 1980년대에 소수 집단으로 시작된 넙치 양식은 여러 세대를 거치는 동안 근친교배가 이루어져 유전적 다양성이 축소되었다. 그 결과, 성장 둔화, 질병 및 환경 내성의 저하(Carvalho and Haeser, 1994)가 우려된다(NFRDI, 2006). 이러한 국내 양식넙치의 유전적 열성화 문제를 해결하기 위해 국립수산과학원 육종연구센터에서는 2003년

부터 2004년에 걸쳐 기존 양식산 집단에 자연산 친어집단을 수집하여 유전적 다양성을 확보하고, 선발육종을 통해 성장이 빠르고 체형이 개선된 신품종 육종넙치인 킹넙치를 개발하였고, 2010년부터 양식 현장에 보급하고 있다(Hwang and Myeong, 2010).

따라서, 본 연구에서는 우리나라 주요 양식품종인 넙치의 현재까지 육종기술 개발을 위한 기본적 개념, 연구 추진 현황과 역사, 최신 기법을 적용한 육종 개발 등을 정리하고 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

본 론

선발육종의 개념

선발육종은 기존의 양식품종을 유전적으로 우수한 개체나 집단을 선발해 이들의 자손을 보다 우수한 품종으로 개량하는 것이다. 이는 기존 품종의 개량에만 국한되는 것이 아니라 실용가치가 높은 계통(line)이나 품종(breed)을 새롭게 개발해 산업화하는 것까지 포함한다. 따라서 선발육종은 일회성 개량으로 완료되는 것이 아니라 세대를 거듭하면서 지속적으로 우량 품종을 만드는 것이므로 세대마다 어떤 개체를 선발해야 하고, 또 교배를 통해 더 좋은 후대를 생산해야 하는 과정들이 체계적이고, 과학적인 계획에 의해 진행되기 때문에 육종연구의 과정 전체를 통틀어 육종프로그램이라고 한다.

일반적으로 어류에 있어서 개체 및 집단의 효과 증대를 위한 가장 이상적이고 효율적인 방법이 선발육종이며(Gjerde et al., 2004; Zheng et al., 2006; Choe et al., 2009), 이를 통해 생산성 향상을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Lucas et al., 2006; Mathilde et al., 2007; Kim et al., 2008; Kim et al., 2011; Park et al., 2021; Park et al., 2022). 육종의 기본 원리는 선발과 교배이다. 즉, 육종 계획과 개량 목표에 알맞은 능력과 대상 형질에 대한 정확한 육종가 추정을 통한 유전적인 능력에 따라 친어를 선발한 다음 최적의 교배를 통해 개량의 효과를 높일 수 있다. 특히 어류는 일회 산란수가 많고, 표현형(phenotype)의 유전적 변이가 커서 선발육종에 의한 유전적 개량에 이점을 가지고 있으며, 전장, 체중, 체형 등 어류의 주요 계측 형질들은 생산성과 관련되는 형질이므로 직접적으로 선발에 이용될 수 있다(Refstie, 1990). 그러나 과학적이지 못한 친어의 선발과 관리는 유전학적 다양성 축소에 따른 선발집단의 근친도 증가와 함께 유전적 병목현상을 초래하여 성장 저하, 빈번한 질병 발생, 기형 등의 외적인 표현형으로 나타날 수 있다.

생물체는 형태학적, 생리학적, 생화학적인 다양한 변이를 가지고 있다. 이러한 변이들은 크게 유전이 가능한 것과 단순히 환경적인 요인에 의한 것으로 나눌 수 있다. 선발육종은 부모 세대로부터 유전이 가능한 변이 중 경제적으로 유용한 변이를 가진 개체가 세대를 거듭하여 교배함으로써 유용 유전자 변이를 축적하여 개체가 가지고 있는 유전적 한계를 극대화하는 것이다. 즉, 생물이 가지고 있는 유전자 자체를 개량하는 것이지 유전자 수를 추가하거나 감소시키는 것은 아니며, 각 유전자 좌(locus)에 있는 불량한 대립유전자(allele)를 우량한 대립유전자로 교체하는 것이다. 다시 말하면 목적하는 유용 유전자의 빈도를 높임으로써 육종 집단의 평균을 증가시켜 유전적 개량량을 최대로 얻고자 하는 것이 선발육종의 궁극적인 목표이다.

넙치 육종연구 현황

기초집단 수집

수집 지역별 기초집단은 우리나라 서해(WW), 동해(WD), 남해(WS)의 자연산 넙치와 4개의 수정란 공급업체(FA, FB, FC, FD)에서 생산된 수정란으로 생산된 넙치였다. 수집된 친어 중 최종 교배에 사용된 친어는 자연산 암컷 149마리(전장 48.9±7.8cm, 체중 1,294.0±744.0g), 자연산 수컷

92마리(전장 42.8±4.3cm, 체중 792.0±326.0g), 양식산 암컷 375마리(전장 50.4±7.0cm, 체중 1651.0±721.0g), 양식산 수컷 149마리(42.2±4.1cm, 체중 898.0±287.0g)이다. 수집된 기초집단을 대상으로 유전적 다양성을 분석한 결과, 양식산이 자연산에 비해 유전적 다양성이 많이 축소되어 있는 것을 확인하였다(Fig. 1). 유전적 다양성이 확보된 1세대 육종넙치 핵집단(F1) 생산을 위해 microsatellite loci 8개를 이용하여 유전적 유연관계를 분석하고, 이를 근거로 교배지침을 작성하였다. 작성된 교배지침은 2005년 4월 6일(Batch 1), 4월 19일(Batch 2), 4월 28일(Batch 3) 3차례에 걸쳐 복부 압박법으로 각각 성숙란과 정액을 추출한 후, 건식법으로 인공수정을 실시하였다. Table 1은 생산 시기별, 자연산 넙치(W) 및 양식산 넙치(C)를 이용한 교배그룹별 생산 가계 수를 나타내었다. B1, B2, B3에서 각각 158 가계, 145 가계, 181 가계를 생산하였으며, 중복 가계를 제외한 총생산 가계 수는 401 가계였다(Kim et al., 2011).

유전자 감식법을 이용한 어류의 친자확인기술 개발

어류는 지구상의 동물 중에서 가장 복잡한 교배 시스템을 가지고 있기 때문에 친자확인을 위해서는 인간 또는 육상동물에서 사용되는 유전자 감식법보다 효과적인 방법이 필요



Fig. 1. Allele distribution of eight microsatellite loci in wild and cultivated populations of olive flounder

Table 1. Number of families produced by scheme with wild and cultured olive flounder broodstocks at three times trials

Batch	Mating group*				Total
	C×C	C×W	W×C	W×W	
Batch 1	78	56	16	8	158
Batch 2	72	31	35	7	145
Batch 3	77	29	62	13	181

* C × C: cultured ♀ × cultured ♂, C × W: cultured ♀ × wild ♂, W × C: wild ♀ × cultured ♂, W × W: wild ♀ × wild ♂, B1: the families produced at April 6. 2005, B2: the families produced at April 19. 2005, B3: the families produced at April 28. 2005.

하다. 즉 인간을 포함한 육상동물의 경우 한 번의 교배에 의해 태어나는 후손이 대체적으로 10마리 이하이므로 친자확인이 그리 까다롭지 않지만, 어류의 경우 많게는 수만에서 수십만의 후손이 한 번의 교배로 태어나기 때문에 상당한 정확성과 효율성이 요구된다. 따라서 여러 종류의 유전자 표지 중에서 개체별 변이가 많은 극소위성(microsatellite)에 의해 가장 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 집단 크기가 클수록 필요한 극소위성좌가 많이 필요하다. Neff(2001)의 경우 자연산 볼루길의 친자확인과 산란 기여도를 조사하기 위하여 11개의 극소위성좌를 사용하였으며, 반면에 Herlinger 등(1995)은 양식산 무지개송어의 육종연구를 위한 친자확인과 산란 기여도 조사에 4개의 극소위성좌를 사용하였다. 또한 Norris 등(2000)은 양식산 대서양 연어의 친자확인을 가계도에 대한 정보가 전혀 없는 상태에서 95%의 정확성을 보이기도 하였다.

우리나라의 어류 양식품종 중에서 생산량이 50% 이상인 넙치의 우량품종을 개발하기 위해서는 1단계로 어미의 유전능력을 정확하게 조사해야 하며, 이를 위해서는 넙치의 주민등록번호라 할 수 있는 개체식별과 친자확인 기술이 확보되어야 한다. 이를 위해 국립수산물연구원 육종연구센터에서는 동, 서, 남해안 각 지역의 자연산 넙치 299마리와 종묘생산업체들로부터 생산된 양식산 넙치 298마리를 수집하여 유전자 감식법을 이용하여 이들의 유전형(genotype)을 분석하였다. 1~4개의 염기의 특이 반복서열인 극소위성 유전자 표지(Microsatellite marker)를 이용한 유전자 다양성 분석에서 자연산 넙치집단의 대립 유전형질의 수는 28~36개, 양식산 집단은 13~17개로 나타났다. 그뿐만 아니라, 양식산의 경우 평균 15개의 대립 유전형질 중 특정 대립형질의 출현 빈도가 매우 높았으며, 또한 동일한 유전형인 순종 호모 개체의 비율이 자연산에 비해 1.6 배 많게 나타나 유전적 다양성이 매우 낮은 것으로 나타났다.

어류의 표현형은 환경의 변수들뿐만 아니라 많은 유전자에 의해 조절되기 때문에 넙치의 육종프로그램 개발 시 환경적 요인을 최대한 제거할 수 있는 모든 종자의 혼합 사육이 필수적이다. 친자확인 기술은 수정란에서부터 혼합 사육된 개체의 부모를 식별할 수 있는 기술로 교배에 사용된 어미의 유전능력을 예측할 수 있는 혈통정보를 제공할 수 있다(Fig. 2). 넙치의 유전자 감식 기술은 극미량(10,000분의 1g)의 넙치 지느러미 조직에서 DNA를 추출하여 한 번에 8개 이상의 유전자형을 분석할 수 있는 기술로서 최소한의 경비로 수천~수만 마리의 넙치를 살아있는 상태에서 개체 식별과 친자확인이 가능하다(Fig. 3, 4 and 5). 특히 기존의 유전자 감식 기술에 비해 시간과 경비면에서 약 1,000배 이상의 효율성을 가짐으로써 향후 타 어종의 유전자 감식 기술에도 활용할 수 있다.

또한, 친자확인 기술을 이용하여 넙치 자연 산란 비밀을 밝혀내었다. 그 결과, 성숙이 양호한 넙치 어미 집단은 하루에 약 50% 정도, 10일 동안 약 90% 정도가 산란에 가입함으로써 산란기간 동안 거의 모든 넙치가 자연산란에 참여하는 것으로 확인되었다. 특히 암수 33마리 중에서 일부 넙치는 10일 동안 20회 이상 자연산란에 가입함으로써 왕성한 교배능력을 보이지만 암컷 1마리와 수컷 2마리는 전혀 산란에 가입하지 않는 것으로 확인되었다(Fig. 6, Fig. 7).

유전능력 평가 및 세대(혈통) 관리

육종(개량)은 우수한 부모로부터 우수한 자손이 나온다는 기본 이론 아래에서 이루어진다. 우수한 부모를 구별해내는 것이 선발이며, 선발의 기준은 유전능력이다. 유전능력은 그 개체가 발휘하고 있는 능력(표현형 능력)이 아니라, 그 개체가 지니고 있고 자손에게 전달할 수 있는 능력을 말한다. 이러한 유전능력은 수학적, 통계적으로 평가된다. 수산생물의 유전능력 평가 형질에는 전 주기에 걸친 일령, 월령 등 일정한 연령에서의 성장 형질, 강건성, 환경 내성, 질병

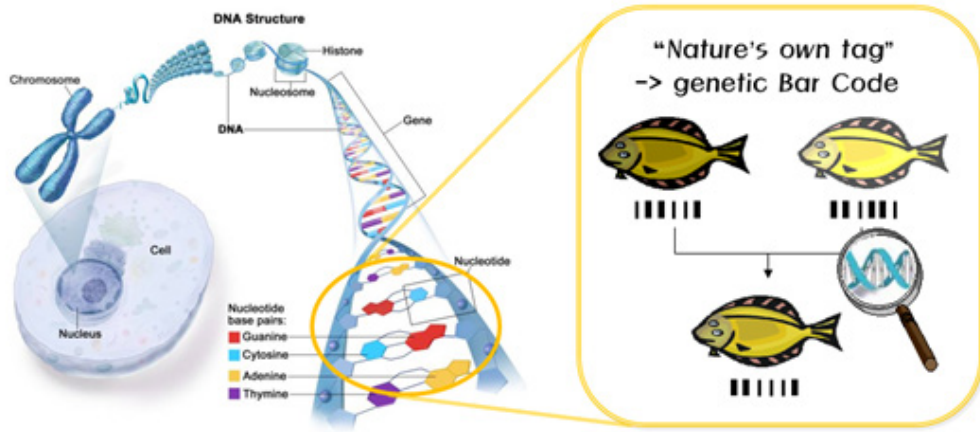


Fig. 2. Schematic diagram of paternity confirmation by genetic identification

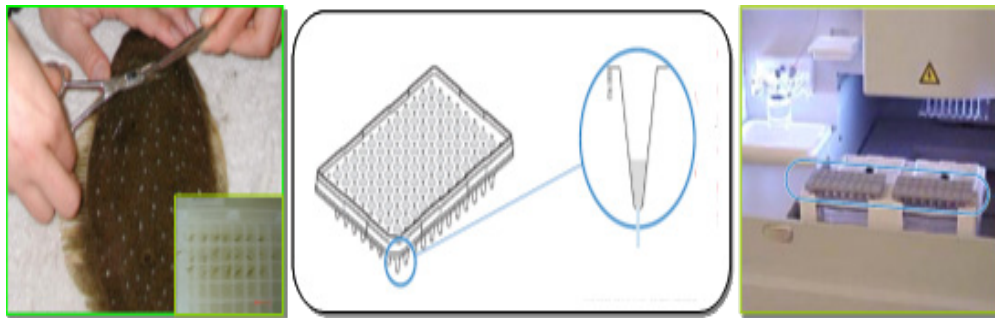


Fig. 3. Trace amount sampling, high-efficiency gene isolation and genotyping

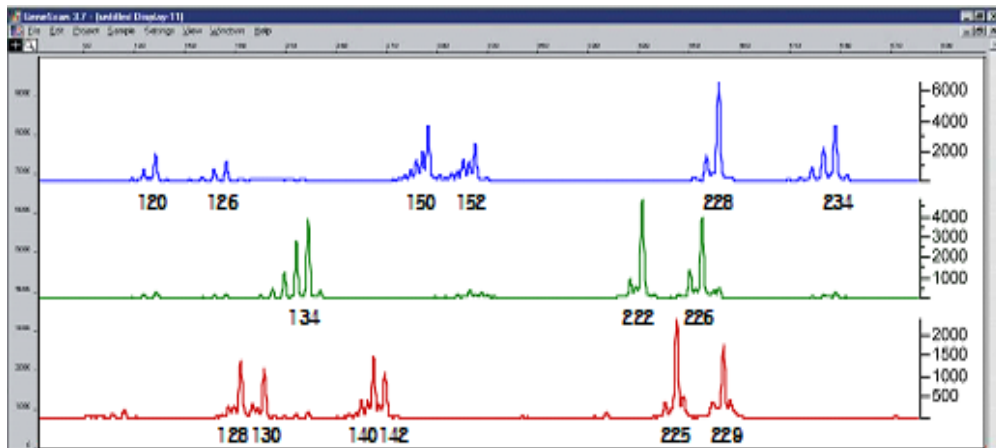


Fig. 4. Genotyping of olive flounder results by multiple amplification

No	Parents	A-1		A-2		A-3		B-1		B-2		B-3		C-1		C-2	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
2	offspring 2	114	116	156	160	204	210	113	117	139	147	192	200	96	110	179	183
1	1A_C#004	84	112	156	160	200	206	113	113	141	145	192	194	110	120	185	195
2	1B_C#010	98	98	148	162	204	210	115	115	141	147	192	200	120	120	180	195
3	1C_C#026	82	102	156	160	204	210	113	113	149	153	184	192	126	140	185	195
4	1D_C#049	100	114	156	158	206	206	115	117	161	167	200	204	118	126	185	217
5	1E_C#066	98	114	148	162	204	206	115	115	141	147	192	200	118	120	185	215
6	1F_C#073	102	114	142	156	204	210	113	113	149	153	184	184	126	140	185	197
7	1G_C#081	114	114	156	160	200	222	117	121	141	143	192	200	120	132	185	183
8	1H_C#095	94	98	156	162	198	220	113	113	141	143	192	200	126	120	180	203
9	2A_C#086	94	104	156	162	210	210	113	115	141	143	184	196	120	140	185	195
10	3B_C#089	82	114	142	156	210	210	113	113	149	153	184	192	126	140	180	195
11	3C_C#092	98	112	142	162	202	222	115	115	141	153	180	192	126	120	185	183
12	3D_C#093	82	102	142	156	204	220	113	113	149	153	184	192	126	140	180	197
13	3E_C#095	94	98	146	148	204	210	113	115	141	147	192	200	120	120	181	195
14	2F_C#099	98	114	158	168	204	210	115	121	141	143	192	200	124	120	180	215
15	2G_C#091	94	102	148	162	198	220	115	115	141	147	192	200	120	120	185	195
16	3H_C#091	98	114	156	158	202	210	113	117	141	145	186	200	118	120	197	219
17	3A_C#014	102	102	142	158	198	204	115	119	141	147	192	200	118	120	185	195
18	3B_C#020	84	98	150	160	222	224	115	117	137	157	186	192	132	134	177	183
19	3C_C#022	98	98	148	160	204	222	113	115	139	141	184	186	96	120	180	219
20	3D_C#024	102	102	148	158	198	204	115	115	141	147	184	186	118	120	185	195
21	3E_C#025	98	102	150	160	204	210	115	115	141	147	186	192	124	120	195	219
22	3F_C#027	84	98	160	168	210	210	115	121	141	145	186	192	112	120	185	189
23	3G_C#030	98	116	144	160	204	220	113	117	139	143	196	200	96	124	175	183
24	3H_C#010	98	98	156	164	210	210	113	115	143	146	186	186	124	124	185	195
25	4A_C#023	98	102	156	160	204	210	113	113	141	147	184	184	118	120	195	215
26	4B_C#032	102	102	148	158	210	210	115	117	141	149	190	196	120	132	195	215
27	4C_C#044	84	94	142	164	220	220	113	121	141	147	184	190	118	120	177	195
28	4D_C#053	84	84	142	162	220	220	113	117	141	147	190	192	118	120	180	185
29	4E_C#063	102	114	156	160	210	236	113	121	141	147	192	192	118	120	177	179
30	4F_C#066	84	114	156	160	210	220	113	121	141	147	192	192	118	120	179	195
31	4G_C#067	94	98	148	164	214	236	113	121	143	147	184	184	118	124	177	195
32	4H_C#077	98	112	148	156	214	222	113	113	141	141	184	184	120	120	195	217
33	5A_C#075	98	116	160	160	206	210	113	113	141	141	192	200	120	120	179	199

Fig. 5. Paternity of olive flounder by genetic identification



Fig. 6. Schematic diagram of 2-day mating of farmed halibut (♀: 15, ♂: 18) in the tank

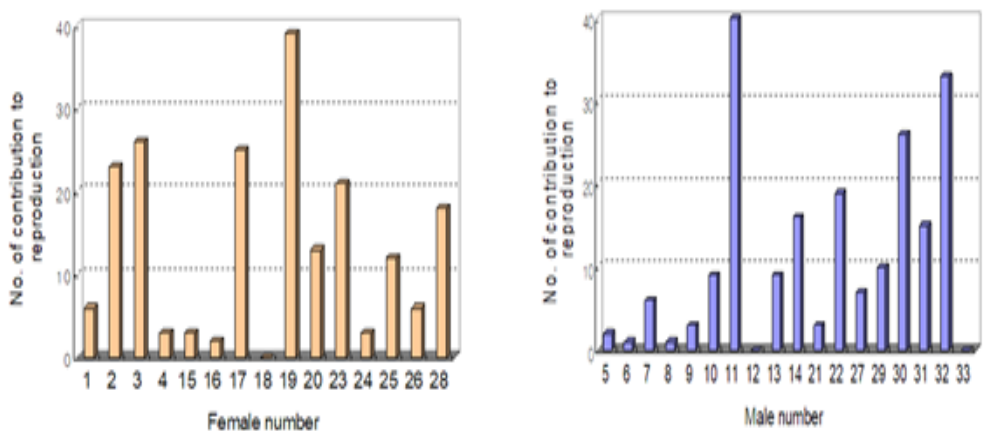


Fig. 7. Spawning contribution of farmed halibut (♀: 15, ♂: 18) in the tank for 10 day

내성, 재생산 능력 등이 있다. 유전능력 평가는 이러한 평가 형질에 대한 개개의 유전력, 유전상관, 육종가 등을 계산해 내는 일련의 과정으로 육종대상 생물 특유의 유전학적 특징에 대해 파악할 수 있게 된다. 여기서 평가된 결괏값을 바탕으로 다음 세대를 위한 부모 세대의 선발이 이루어진다. 즉, 어느 개체를 부모로 사용할 것인가? 교배는 어떻게 할 것인가? 선발 강도와 선발 시기는 어떻게 할 것인가를 결정하게 된다. 또한, 선발된 부모로부터 생산된 자손의 능력은 어느 수준 인가 등의 예측도 가능해 모집단의 평균으로부터 다음 세대 집단의 평균이 어느 정도 이동하느냐는 것을 사전에 예측할 수 있으며, 이에 따라 계획적이고 과학적인 육종이 가능하게 된다.

부모의 능력이 우수해야 그 자손에게서도 우수한 능력을 기대할 수 있다. 여기서 말하는 우수한 능력을 가진 넙치란 성장이 빠르고 체형이 좋으며, 질병과 급격한 환경 변화에도 잘 견디는 넙치를 말한다. 그러나 능력이 좋다고 생각했던 넙치가 자손을 생산했는데, 그 자손의 능력이 부모의 능력 넙치의 육종가를 추정하기 위해서는 정확한 혈통과 표현형 자료가 충분히 확보되어야 한다. 이러한 혈통자료와 표현형 자료는 넙치 집단의 유전적 특성을 파악하는 데 중요한 역할을 하고, 유전적 특성을 바탕으로 개체의 육종가를 더욱 정확하게 추정할 수 있다. 집단의 유전적 특성으로 가장 먼저 파악해야 하는 것은 경제적 가치가 있는 형질에 대한 유전력과 형질 간의 상관관계이다. 이를 유전모수라고 하며, 유전력의 학술적 의미는 전체 표현형 변이 중에서 유전적 변이가 차지하는 비율이라고 할 수 있다. 유전력이 높다는 말은 개체 간의 능력 차이가 대부분 개체가 갖는 유전자의 차이에 의해 나타나고, 유전력이 낮다는 것은 개체 간의 차이가 대부분 환경의 영향에 의한 것이라는 의미이다. 따라서 유전력이 높은 형질에 대해 선발할 경우, 선발효과가 크다는 것을 의미한다. 반면, 유전력이 낮은 형질에서는 개체 간의 유전적인 차이가 작으므로 어떤 개체를 선발하더라도 자손에 물려주는 유전적 능력의 차이가 작으므로 선발 효과가 떨어진다는 의미이다. 육종가 추정은 집단의 특성과 개체 자신의 표현형 성적, 혈연관계가 있는 다른 개체의 표현형 성적을 활용하여 이루어지기 때문에 정확한 혈통과 표현형 자료가 충분히 확보되었을 때 개체의 육종가에 대한 신뢰도를 높일 수 있다. 국립수산물연구원 육종연구센터에서는 체계적이고 과학적인 넙치 선발육종을 위해 기초집단 수집을 시작으로 인공채란 및 채정 → 암수 1:1 인공수정 및 혼합 사육 → 유전학적 친자확인 → 유전능력 평가 → 친어 선발 및 교배지침 수립의 반복과정을 통해 유전적 다양성이 확보된 세대마다 200 가계 이상의 육종 집단을 생산, 관리하고

있다(Fig. 9). 을 따라가지 못한다면 능력이 좋은 개체라는 평가는 잠시 미뤄둬야 한다. 우리가 진정 바라는 넙치는 자기 능력도 좋고, 그 자손의 능력은 더 우수한 그런 개체이다. 양식장에서 걸로 드러나는 능력(표현형)으로 넙치를 평가하여 선발하고 수정란을 생산하기 위해 교배시키는 방법은 그 넙치의 혈통, 즉 부모의 정보를 알지 못하고 교배하는 방법으로 근친의 우려가 클 뿐만 아니라, 그 개체의 정확한 유전능력을 알지 못하고 교배하는 방법이다. 그러면 왜 넙치의 유전능력을 평가하여 친어를 선발하는 것일까? 아래의 Fig. 8과 같이 부화 후 12개월령 체중의 전체 평균이 800g인 집단에서 950g으로 같은 A, B 두 마리가 있다고 하자. 두 마리 모두 집단의 평균보다 높은 표현형 성적을 갖고 있다. A 개체는 환경요인에 의해 50g, 유전적 요인에 의해 100g이 평균보다 높고, B 개체는 환경요인에 의해 100g, 유전적 요인에 의해 50g이 평균보다 높다(Fig. 8).

만약 유전능력을 평가하지 않았다면 두 개체를 평가할 방법은 표현형 성적밖에 없다. 그 경우 A나 B 중 아무 개체나 선발하여 교배할 수 있지만, 후대에 영향을 미칠 수 있는 개체의 유전적 요인이 B 개체보다 A 개체가 높기 때문에 A 개체를 선발하여 교배하는 것이 자손의 능력을 향상할 수 있을 것이다. 이처럼 넙치의 능력은 환경적인 요인과 유전적 요인으로 구분할 수 있는데 그 중 유전적 요인이 얼마나 되는지를 알아내는 것이 유전능력 평가이고, 개체의 유전능력을 육종가(breeding value)로 표현하는 것이다.

넙치의 육종가를 추정하기 위해서는 정확한 혈통과 표현형 자료가 충분히 확보되어야 한다. 이러한 혈통자료와 표현형 자료는 넙치 집단의 유전적 특성을 파악하는 데 중요한 역할을 하고, 유전적 특성을 바탕으로 개체의 육종가를 더욱 정확하게 추정할 수 있다. 집단의 유전적 특성으로 가장 먼저 파악해야 하는 것은 경제적 가치가 있는 형질에 대한 유전력과 형질 간의 상관관계이다. 이를 유전모수라고 하며, 유전력의 학술적 의미는 전체 표현형 변이 중에서 유전적 변이가 차지하는 비율이라고 할 수 있다. 유전력이 높다는 말은 개체 간의 능력 차이가 대부분 개체가 갖는 유전자의 차이에 의해 나타나고, 유전력이 낮다는 것은 개체 간의 차이가 대부분 환경의 영향에 의한 것이라는 의미이다. 따라서 유전력이 높은 형질에 대해 선발할 경우, 선발효과가 크다는 것을 의미한다. 반면, 유전력이 낮은 형질에서는 개체 간의 유전적인 차이가 작으므로 어떤 개체를 선발하더라도 자손에 물려주는 유전적 능력의 차이가 작으므로 선발 효과가 떨어진다는 의미이다. 육종가 추정은 집단의 특성과 개체 자신의 표현형 성적, 혈연관계가 있는 다른 개체의 표현형 성적을 활용하여 이루어지기 때문에 정확한 혈통과

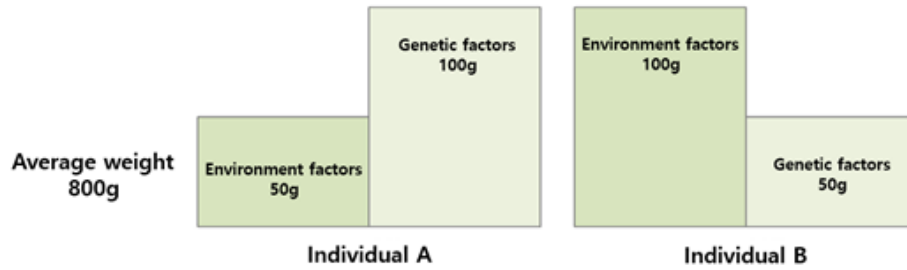


Fig. 8. Environmental and genetic factors influencing identical phenotypic performance

표현형 자료가 충분히 확보되었을 때 개체의 육종가에 대한 신뢰도를 높일 수 있다. 국립수산물과학원 육종연구센터에서는 체계적이고 과학적인 넙치 선발육종을 위해 기초집단 수집을 시작으로 인공채란 및 채정 → 암수 1:1 인공수정 및 혼합 사육 → 유전학적 친자확인 → 유전능력 평가 → 친어 선발 및 교배지침 수립의 반복과정을 통해 유전적 다양성이 확보된 세대마다 200 가계 이상의 육종 집단을 생산, 관리하고 있다(Fig. 9).

넙치 선발육종을 위해서는 개체관리를 통한 정확한 혈통자료 구축이 필수이다. 이를 위해 육종연구센터에서는 인공수정 이후 세대별 부화 후 11개월령에 RFID 전자칩을 삽입(10,000마리 내외)하고, 넙치 가슴지느러미 조직을 채취하여 친자확인에 이용한다. 그리고 주기적으로 성장 형질(전장, 체중, 비만도 등)을 측정하고, 사육밀도 조절 등 개체관리를 체계적으로 추진하고 있다(Fig 10).

국립수산물과학원 육종연구센터에서는 2004년부터 유전자 표지를 이용한 분자육종과 전통적인 선발육종을 접목하여 최적의 육종기술을 개발하였다. 즉, 과학적인 교배지침에 따라 선발 1세대 육종넙치(F1)를 생산하여 유전능력을 평가하였고, 이를 기초로 2007년에 2세대(F2), 2009년에 3세대(F3), 2011년에 4세대(F4), 2014년에 5세대(F5), 2017년에 6세대(F6), 2019년에 7세대(F7) 그리고 2021년에 8세대(F8)를 생산하였다. 선발육종에 의한 넙치 육종 집단의 부화 후 11개월 성장 형질은 매 세대 유전적인 개량 효과를 보였으며, 특히 8세대(F8)의 평균 전장(40.3 cm)의 경우 1세대(28.6 cm) 대비 40.9% 개량되었으며, 평균 체중(806.8 g)은 1세대(291.9 g)에 비해 276.4% 개량되었다(Fig 11).

최근 다형질 Animal model을 이용한 선발 8세대 육종넙치 7,508마리(217 가계)의 부화 후 11개월령 성장형질에

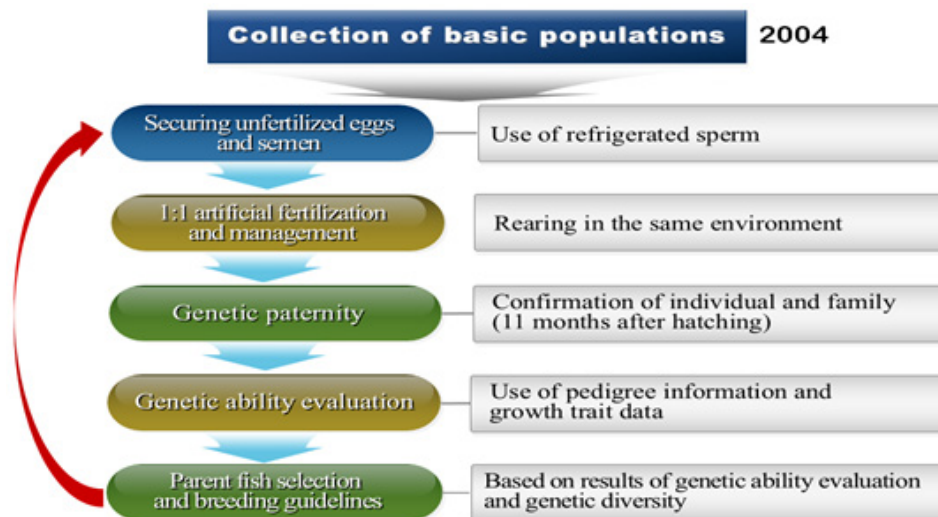


Fig. 9. Selection breeding program system of olive flounder

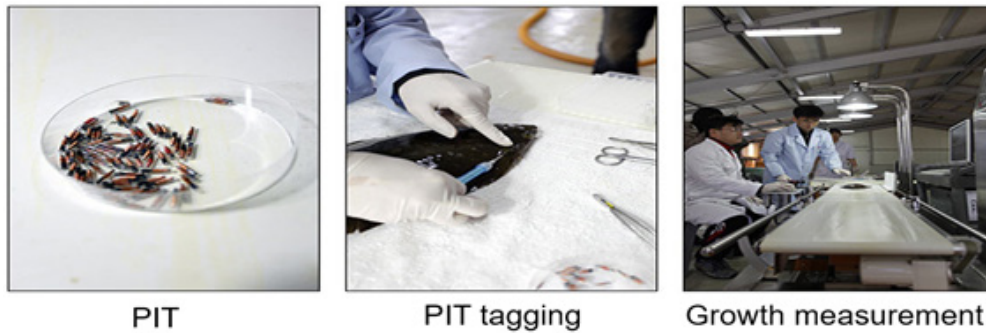


Fig. 10. Individual management for selective breeding of olive flounder

대한 유전모수 추정(Park et al., 2022)에 대한 연구결과를 살펴보면 유전력의 경우 전장이 0.479, 체중이 0.457 그리고 비만도가 0.466으로 높은 유전력을 보였다. 이처럼 전장, 체중 및 비만도의 유전력이 모두 0.4 이상으로 높은 유전력을 보여 가계선발보다는 개체선발이 유리할 것으로 판단된다. 유전력은 전체 분산 중에서 상가적 유전분산이 차지하는 비율 또는 선발차에 의한 유전적 개량량으로 정의할 수 있다. 유전력의 취할 수 있는 값의 범위는 0과 1 사이이며, 유전 효과가 전혀 없으면 0이고, 반대로 환경 효과 없이 유전 효과만으로 표현형이 나타나면 1의 값을 가지게 된다. 그러나 성장 형질과 같은 양적 형질의 유전력은 0과 1의 값을

갖기보다는 통상적으로 이 범위 내의 값으로 나타난다. 유전력이 0~0.2의 범위는 저도의 유전력, 0.4 이상이면 고도의 유전력이 있다고 한다. 유전모수와 유전력은 시대, 품종, 집단, 형질 사육환경 그리고 추정 방법에 따라 다양하게 나타나며, 특히 유전력은 높고 낮음에 따라 선발 전략 수립에 중요한 지표가 되는데, 유전력이 높으면 개체선발이 효율적이고, 반대로 유전력이 낮을 때 가계선발이 효율적이다. 이는 유전력이 낮을 때 개체 간의 능력 차이가 주로 환경요인에 의해 나타나므로 표현형에만 근거하여 정확한 유전자형을 추정하기 어렵기 때문이다(Park et al., 2021).

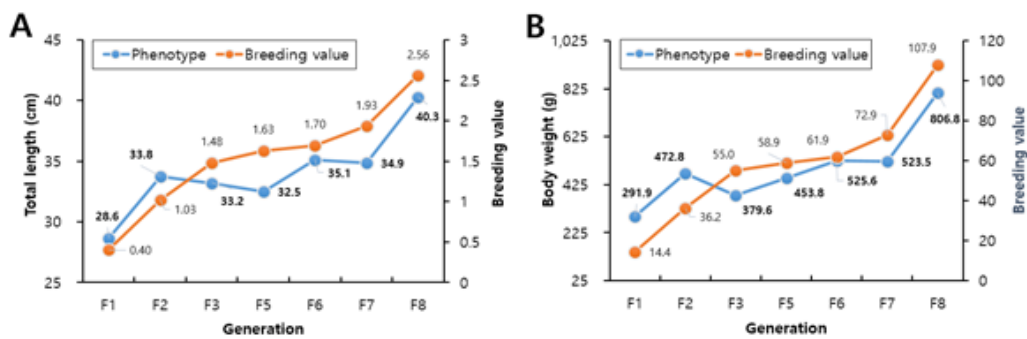


Fig. 11. Trend of phenotype and genetic change by generation of selected breeding olive flounder. A, total length; B, body weight

육종품종의 산업화

국립수산과학원 육종연구센터에서 개발한 육종기술 중 가장 핵심은 전통적 선발육종과 차별화되는 기술로서 친어집단의 유전적 관리를 통한 고부가가치의 우량 품종을 개발하기 위하여 유전자 표지(DNA marker)를 이용한 분자육종과 전통적인 선발육종을 접목하여 지속적인 후대 생산을 통해

경제형질을 개선하는 효율적인 첨단 육종기술을 이용하는 것이다. 국립수산과학원 육종연구센터에서는 이러한 선발육종기술을 통해 성장이 30% 이상 빠르고, 체형이 개선된 “킹넵치”를 개발하였으며, 국유특허 기술이전을 통해 민간 양식장에 킹넵치 수정란을 보급 중이다(Fig 12).

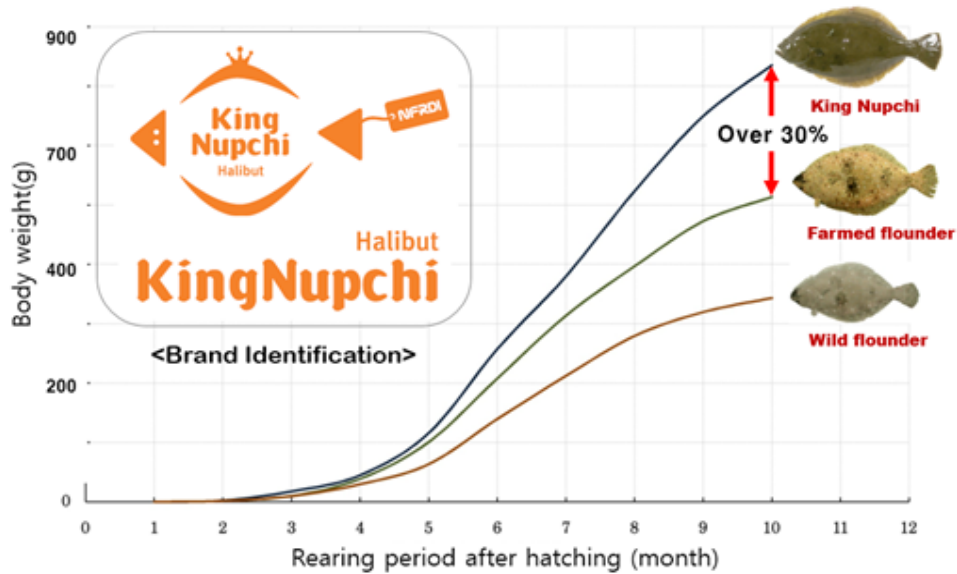


Fig. 12. Development of fast breeding olive flounder (KingNupchi)

넙치 육종의 미래

최근 분자생물학과 분자유전학의 진보와 더불어 급속히 발전한 생명공학 기술이 새로운 육종방법과 전략을 제시하고 있다. 유전체 해독 장비와 분석기술 발전은 디지털정보의 생산 비용을 절감시키고, 분석 기간을 단축시켜 전 세계적으로 다양한 생물의 유전체 연구를 가속화하고 있다. 유전체 분석·활용 기술은 수산 분야의 패러다임을 전환하는 원천기술로 사용되며, 세계 각국에서는 우량종자 개발을 위해 수산생물의 유전체 연구를 전략적으로 추진하고 있다. 유전체 정보 기반의 선발육종 방법은 개체의 유전체 정보를 고려한 선발모델을 통해 우수개체 선발의 효율을 높일 수 있으며, 장기간의 시간이 소요되는 기존의 선발육종의 한계를 보완할 수 있는 새로운 육종기술이다. 유전체 정보 기반의 선발육종은 유전변이 생산을 위해 SNP 칩을 이용하는 데, 속성장과 내병성과 같은 목적형질 분석을 위해 고밀도 SNP 칩을 이용하면 양적 형질의 유전분산에 이바지하는 유전자와 유전변이를 효과적으로 검출할 수 있으며, 경제형질 관련 유전자 및 유용 유전자 연구와 접목할 수 있어 이용 가치가 매우 크다.

유전체 선발의 가장 큰 장점은 유전체 정보를 이용해 유전능력을 조기에 추정할 수 있다는 것으로 세대 간격을 줄일 수 있으며, 단기간 다형질 개량이 가능해 육종 효율을 극대화할 수 있다. 우량종자 자원의 국제적인 배타적 재산권 강화 추세에 따라 세계 각국이 전략적으로 종자 개발에 총력을 다하고 있다. 최근 국립수산과학원 육종연구센터에서도

유전체 선발 육종기술을 도입하여 다양한 형질을 대상으로 획기적인 육종을 위한 연구에 박차를 가하고 있다(Fig. 13).

결론

인간 수명이 연장되면서 육상에서 생산되는 식량의 생산량은 한계에 직면하고 있는 실정이며, 이러한 문제를 해결할 방안으로 많은 미래학자는 해양·수산을 지목하고 있다. 그중 수산생물의 양식을 통한 생산물은 인류의 단백질 공급을 통한 식량 안정화에 이바지할 것으로 예측된다. 선발육종은 수산동물에 있어서 가장 효과적인 육종방법이며, 실질적인 유전적 개량을 통해 표현형가와 육종가의 상관관계를 높이는 것이다. 이를 위해서는 선발 시기, 선발 방법 및 교배 방법뿐만 아니라 유전모수와 육종가를 정확하게 분석하여 선발과 교배에 적절히 이용하는 것이 중요하다. 두 가지 이상의 형질에 대해 선발하려면 형질 간의 유전상관 및 표현형 상관을 알아야 하며, 특히 선발에 따른 기대 반응을 추정할 때도 유전적인 상관관계는 필요하다. 따라서 본 연구의 결과와 같이 다음 세대 생산을 위한 친어 선발의 정확성을 높이기 위해서는 각 형질에 영향을 미치는 성과 가계의 특성 파악이 필요하며, 더불어 개량하고자 하는 형질 간의 표현형 및 유전적인 상관관계도 선발육종에 적절히 이용한다면 보다 효과적인 개량을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 우리나라가 상대적으로 높은 기술력을 보유하고 있는 넙치 양식산업과 국가적인 차원에서 체계적이고 과학적인 계획에 의해 진행되는 육종연구를 통해 소비자가 원하는

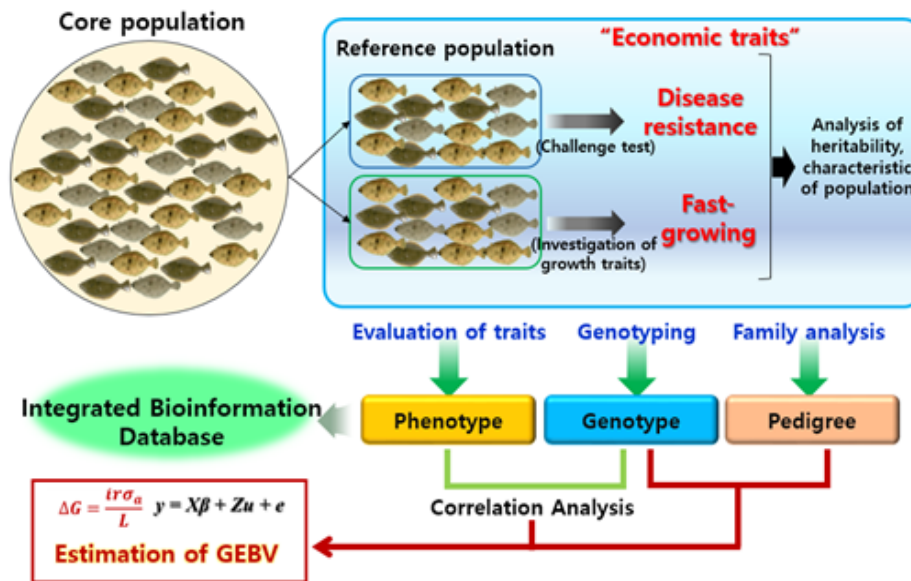


Fig. 13. Discovery of economic traits and analysis of integrated bioinformation for olive flounder

고급 품질의 넙치를 생산할 수 있는 기술을 개발할 수 있다. 넙치 육종기술 개발은 국내 소비를 확대하고, 나아가서 외국으로 넙치 수출량을 더욱 확대시켜 양식산업의 재도약이 되는 발판이 마련될 것이다. 넙치 양식산업에서의 육종연구는 무려 여덟 가지의 이득을 얻을 수 있는 핵심기술로 일석팔조의 가치가 있다. 단위 면적당 생산량이 늘어나고, 사육비 및 인건비가 줄어들며, 친환경적이고 안전한 방법으로 생산할 수 있다. 또한 생산된 수산물의 부가가치가 높아지고, 어가의 소득이 늘어나며, 종자의 국제 경쟁력이 높아질 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Carvalho GR, Hauser L. (1994). Molecular genetics and the stock concept in fisheries. *Rev Fish Biol Fish* 4:326-350.
2. Choe MK, Yang SG, Won SH, Park CJ, Han SJ, Yeo IK. (2009). Estimation of genetic parameters for growth-related traits in 9-month old of two Korean abalone subspecies *Haliotis discus hannii* and *H. discus*, by using multiple traits of animal model. *Korean J Fish Aquat Sci* 42:591-599.
3. Davidson J, Summerfelt S, Espmark AMO, Mota VC, Marancik D, Earley RL, Snead A, Good C. (2021). Effects of ozone on post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*) performance, health, and maturation in freshwater recirculation aquaculture systems. *Aquaculture* 533:1-12.
4. Duncan NJ, Bromage N. (1998). The effect of different periods of constant short days on smoltification in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 168:369-386.
5. Endal HP, Taranger GL, Stefansson SO, Hansen T. (2000). Effects of continuous additional light on growth and sexual maturity in Atlantic salmon, *Salmo salar*, reared in seacages. *Aquaculture* 191:337-349.
6. Gjerde B, Terjesen BF, Barr Y, Lein I, Thorland I. (2004). Genetic variation for juvenile growth and survival in Atlanticcod *Gadus morhua*. *Aquaculture* 236:167-177.
7. Herbinger CM, Doyle RW, Pitman ER, Paquet D, Mesa KA, Morris DB, Wright JM, Cook D. (1995). DNA fingerprint analysis of paternal and maternal effects on offspring growth and survival in communally reared rainbow trout. *Aquaculture* 137:245-256.
8. Hwang JW, Myeong JI. (2010). An economic effect of the selective breeding program on the olive flounder aquaculture. *J Fish Bus Adm* 41:113-128.

9. Jonsson N, Hansen LP, Jonsson B. (1994). Juvenile experience influences timing of adult river ascent in Atlantic salmon. *Animal Behaviour* 48:740-742.
10. Kim HC, Noh JK, Lee JH, Kim JH, Park CJ, Kang JH, Kim KK, Lee JG, Myeong JI. (2008). Estimation of genetic parameters and reproductivity test of genetic evaluation for growth-related traits of olive flounder *Paralichthys olivaceus* at 180 days of age. *J Aquaculture* 21:317-324.
11. Kim HC, Noh JK, Lee JH, Park CJ, Min BH, Kim KK, Kim JH, Lee JG, Myeong JI. (2011). Estimation of genetic parameters of growth-related traits from 11-month-old olive flounder *Paralichthys olivaceus* base population in which wild flounder broodstocks were introduced. *J Anim Sci Technol* 53:99-106.
12. Lucas T, Macbeth M, Degan SM, Knibb W, Degan BM. (2006). Heritability estimates for growth in the tropical abalone *Haliotis asinina* using microsatellites to assign parentage. *Aquaculture* 259:146-152.
13. Mathilde DN, Marc V, Alain V, Olivier M, Pierrick H, Herve C, Beatrice C. (2007). Heritabilities and GxE interactions for growth in the European sea bass (*Dicentrarchus labrax L.*) using a marker-based pedigree. *Aquaculture* 275:81-87.
14. Neff BD. (2001). Genetic paternity analysis and breeding success in bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*). *J. Heredity* 92:111-119.
15. NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2006. Standard Manual of Olive Flounder Culture. Haerin, Busan, Korea.
16. Norris AT, Bradley DG, Cunningham EP. (2000). Parentage and relatedness determination in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) using microsatellite markers. *Aquaculture* 182:73-83.
17. Panya SL, Antti K, Marie L, Han AM. (2017). Estimation of breeding values for uniformity of growth in Atlantic salmon (*Salmo salar*) using pedigree relationships or single-step genomic evaluation. *Genet Sel Evol* 2017:49:33.
18. Park JW, Lee DI, Jung HS, Kim JL, Yang HR, Lee JH. (2021). Estimation of genetic parameters and improvements for growth traits of selected olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Korean J Fish Aquat Sci* 54:974-981.
19. Park JW, Lee DI, Jung HS, Kim JL, Yang HR, Lee JH. (2022). Estimation of Genetic Parameter for Growth Traits of Olive Flounder *Paralichthys olivaceus* on the 8th Generation of Selective Breeding Using Multiple Traits Animal Model. *Korean J Fish Aquat Sci* 55(5):549-556.
20. Sonesson A, Ødegård J, Ronnegard L. Genetic heterogeneity of withinfamily variance of body weight in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Genet Sel Evol.* 2013;45:41.
21. Refstie T. (1990). Application of breeding schemes. *Aquaculture* 85:163-169.
22. Zheng H, Zhang G, X Liu X. Guo. (2006). Sustained response to selection in an introduced population of the hermaphroditic bay scallop *Argopecten irradians irradians* Lamarck(1819). *Aquaculture* 255:579-585.