

# 다형질 개체 모형을 이용한 북방전복 육종집단의 성장형질에 대한 유전적 변화추세 추정

박종원, 김혜진, 이다인, 정민환, 김주란, 임채현, 김현철

국립수산과학원 육종연구센터

## Estimation of Genetic Trend for Growth Traits of Pacific Abalone, *Haliotis discus hannai* using Multiple Traits Animal Model

Jong-Won Park, Hyejin Kim, Dain Lee, Min-Hwan Jeong, Julian Kim, Chaehyeon Lim and Hyun-Chul Kim

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

### ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate the effects of environmental factors such as sex that affect the growth traits of the Pacific abalone (*Haliotis discus hannai*) breeding group and the trend of genetic change by generation. Phenotypic and pedigree data of shell length, shell width, and total weight at 30 months for 12,783 abalone breeding groups (F1 to F5) produced from 2005 to 2017 were used. To estimate genetic parameters, heritability, and breeding values for the growth traits, generation and sex were treated as fixed effects, and the AIREMLF90 and BLUPF90 programs were used. The heritabilities of shell length, shell width, and total weight were 0.461, 0.469, and 0.346, respectively. As a result of estimating the genetic change trend for growth traits, a clear genetic increase trend was shown as generations passed. In order to improve the accuracy of dam selection and genetic improvement of future generations, it is especially important to minimize inbreeding by maintaining the genetic diversity of the population. In addition to systematic pedigree management of the population, continuous breeding research using genetic parameters and breeders is necessary.

**Key words** : Pacific abalone, Breeding value, Genetic parameter, Growth trait

### 서론

전복은 양식생산액이 2022년 기준 6,786억 원으로 부가가치가 매우 높은 우리나라 주요 양식품종이다. 1960년대 증양식 연구, 1980년대 대량 종자생산기술 개발 그리고 2000년대 해상가두리 양식기술개발 등으로 전복 양식산업이 가속화되었다 (NFRDI, 2008). 그러나 전복은 성장속도가 느리고 출하시 까지 긴 시간 소요될 뿐만 아니라 최근 기후변화에 따른 고

수온의 영향으로 대량 폐사가 발생하는 등 심각한 문제점을 가지고 있다. 특히 우리나라 고유종으로 전 연안에 분포하고 있는 한류성인 북방전복은 육종을 통한 성장향상으로 생산원가를 절감할 필요가 있다. 국내외적으로 전복의 성장 개량을 위한 다양한 육종연구가 수행되어 왔으며 (Vinna, 2002; Kube *et al.*, 2007; Symonds *et al.*, 2012; Arai and Okumura, 2013; Park *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2022), 생산성 향상을 위한 선발육종 연구도 지속적으로 진행되고 있다 (Argue *et al.*, 2002; Gjerde *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2006).

현재 선발육종을 위해서 유전능력평가를 위해 주로 이용되는 개체 모형 (Animal model) 은 모든 혈통정보를 고려하여 육종가 (breeding value) 를 추정하도록 고안되었다. 유전능력을 추정하고 평가의 정확도를 중대시키기 위해서 개체 자신의 기록 또는 형제자매 등 친척 간의 능력을 고려하여 서로의 유전적 정보를 공유한다. 가축분야에서는 1970년대 혼합 모형

Received: December 12, 2023; Revised: December 20, 2023;  
Accepted: December 30, 2023

Corresponding author: Hyun-Chul Kim

Tel: +82 (55) 639-5800, e-mail: hckimgnu@korea.kr  
1225-3480/24855

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

(Mixed model) 을 이용한 최적선형불편예측법 (BLUP) 이 발표되면서 통계적인 선발육종 방법이 비약적인 발전을 거듭하였다. 육종의 목적은 여러 세대를 거치면서 우량 경제형질들을 지닌 후대를 생산해내는 부모를 찾아내기 위한 것이다. 가족과 마찬가지로 패류나 어류 역시 육종의 기본 개념은 동일하지만 육종에 있어 근본적인 차이는 육상동물보다 복잡한 수산양식 생물의 번식생태이다. 특히 선발육종은 수산 양식생물의 생산성 향상을 위한 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 일반적으로 수산 양식생물은 후대 자손수가 많고 표현형의 변이가 커서 육상동물보다 육종을 통한 개량 효과 즉, 선발반응이 크다 (Olesen *et al.*, 2003). 선발육종을 통한 경제형질의 유전적인 능력을 향상시키기 위해서는 체계적인 선발과 교배 등의 육종계획이 필요하다. 유전적 개량은 육종가의 정확도에 따라 결정되며, 육종가를 보다 정확하게 추정하기 위해서는 혈통을 이용한 모집단의 주요 경제형질에 대한 유전상관, 잔차상관 및 공분산 등의 유전모수와 유전력이 먼저 추정되어야 한다.

우리나라에서는 2004년부터 북방전복을 대상으로 성장 향상을 위해 체계적인 혈통관리와 더불어 유전자 표지를 이용한 선발육종 연구를 추진해오고 있다. 이에 본 연구는 북방전복 육종집단의 유전모수, 유전력 그리고 육종가를 이용한 유전적 변화추세를 추정하여 국내 전복 양식산업의 생산성 향상 및 향후 전복 육종연구를 위한 기초자료를 제공하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 재료

본 연구에 이용된 재료는 2005년부터 2017년까지 3년 주기로 생산된 북방전복의 육종집단 (F1-F5) 으로서, 성장형질인 각장, 각폭, 중량에 영향을 미치는 세대 및 성의 효과와 유전모수, 유전력, 육종가 그리고 유전적 변화 추세 추정을 위해 부화 후 30개월령의 성장 측정기록이 있는 개체 15,855 마리 중에서 암수 성 확인 및 친자감별이 모두 완료된 12,873 마리를 이용하였다. 본 연구에서 이용된 북방전복 육종집단은 매 세대 유전적 다양성을 유지 위해 microsatellite DNA (deoxyribonucleic acid) 마커를 이용하여 개체 또는 가계 간 유전적 유연관계를 분석하고, 모페집단의 성장형질 유전능력평가의 결과 및 유연관계를 고려한 각 세대별 교배지침에 따라 암수 1:1 인공수정으로 생산되었다. 생산시기의 오차를 줄이기 위해 암수 모패를 동시에 채정, 채란 및 인공수정을 하였고, 사육수온, 밀도 등 환경요인의 영향을 최소화하기 위해 동일한 사육수조에서 사육하였다. 부화유생의 먹이로는 파판의 부착규조와 배합사료를 공급하였으며, 치패 단계부터는 생먹이인 미역과 다시마를 공급하였다. 부화 후 30개월령 성장형질인 각장, 각폭 및 중량은 고정밀 측정 기기를 이용하여 소수점 두자리까지 각 개체별

로 측정하였으며, 성장형질 측정값의 오류 제거를 위해 표준편차의  $\pm 3$ 배에 해당되는 자료를 삭제하고 유전모수와 육종가를 추정하였다.

### 2. 통계분석방법

#### 1) 유전모수, 유전력 및 육종가

본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 성장형질인 각장, 각폭, 중량에 대한 유전모수, 유전력 및 개체별 육종가를 추정하기 위해 세대와 성을 고정효과로 처리하였으며, AIREMLF90 (Misztal *et al.*, 2002) 을 이용하여 최적선형불편예측법 (Best linear unbiased prediction : BLUP) 에 의해 다음과 같은 다형질 개체모형 (Multiple traits of animal model) 을 이용하였다.

$$y_{ijkl} = \mu_i + G_{ij} + S_{ik} + a_{ijkl} + e_{ijkl}$$

여기서,  $y_{ijkl}$ 는  $i$ 번째 형질에서  $j$ 번째 세대의  $k$ 번째 성에 속하는  $l$ 번째 개체의 대한 측정치,  $\mu_i$ 는  $i$ 번째 형질에 대한 전체 평균,  $G_{ij}$ 는  $i$ 번째 형질의  $j$ 번째 세대의 효과 ( $j = 1, 2, 3, 4, 5$ ),  $S_{ik}$ 는  $i$ 번째 형질의  $k$ 번째 성의 효과 ( $k = 1, 2$ ),  $a_{ijkl}$ 은 개체에 대한 임의의 효과  $\sim N(0, G)$  이며,  $e_{ijkl}$ 는 임의오차  $\sim N(0, R)$  이다. 여기서  $G$ 는 각 성장형질들 사이의 상가적 유전-공분산이며,  $R$ 은 임의오차의 분산-공분산이다. 추정 값이 지역 최대값 (Local maximum) 에 수렴되는 것을 방지하기 위해서 최종적으로 구해진 추정값을 시작으로 하여 그 차이가  $10^{-9}$  이하로 되는 것을 수렴되는 값으로 결정하였다. 구해진 분산-공분산 값을 이용하여 상가적 유전분산 ( $\sigma_a^2$ ) 과 환경 분산 ( $\sigma_e^2$ ) 에 의한 유전력 ( $h^2$ ) 계산은 다음과 같이 구하였다 (Groeneveld and Kovac, 1990).

$$h^2 = \frac{\hat{\sigma}_a^2}{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2}$$

#### 2) 유전적 변화 추세의 추정

본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 유전적 및 표현형의 변화 추세는 육종가와 표현형 값을 각각 세대에 회귀시켜 구하였으며, 회귀 모형은 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

여기서,  $y_i$ 는  $i$ 번째 세대의 육종가 및 표현형가 ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ),  $\beta_0$ 는 절편,  $\beta_1$ 은 세대에 대한 회귀 계수,  $x_i$ 는  $i$ 번째 세대,  $\varepsilon_i$ 는  $i$ 번째 측정된  $y$ 의 오차항이며, 위의 모형에서와 같이

**Table 1.** Overall means for growth traits of the Pacific, *Haliotis discus hannai* for all generation at the age of 30-months

Traits	Means ± STD	Minimum	Maximum	Kurtosis	Skewness	CV <sup>1)</sup> (%)
Shell length (mm)	80.28 ± 9.52	33.00	110.80	-0.22	-0.27	0.119
Shell width (mm)	52.79 ± 6.70	24.00	73.40	-0.43	-0.28	0.127
Total weight (g)	62.99 ± 20.2	4.50	148.90	-0.08	0.35	0.321

<sup>1)</sup> CV : Coefficient of variation ( $CV = STD / Mean$ )

회귀 계수인  $\hat{\beta}$  와 표준오차인  $s_{\beta}$ 는 다음과 같이 구하였다.

$$\hat{\beta} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

$$s_{\beta} = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2(n-2)}}$$

### 3) 육종가의 정확도 (Accuracy) 추정

추정된 육종가의 정확도는 육종가의 표준오차를 이용하여 예측값에 있어서 오차분산 (Prediction error variance; PEV) 을 계산하고, 이를 이용하여 다음과 같은 공식을 이용하였다.

$$Accuracy = \sqrt{1 - \frac{PEV}{\sigma_A^2}}$$

여기서, PEV는 추정된 육종가의 오차분산,  $\sigma_A^2$ 는 상가적 유전분산 (Additive genetic variance) 이다.

### 4) 정규성 검정 및 상관계수 추정

집단의 각 성장형질에 있어서 확률분포에 대한 정규성 검정 (Normality test) 을 위해 SAS Package (Ver. 9.2) 의 Univariate 프로시저 (procedure) 를 이용하였으며, 조사된 각 형질 간의 표현형 상관계수 ( $r_P$ ) 및 유전 상관계수 ( $r_G$ ) 는 다음과 같은 공식을 이용하였다.

$$r_P = \frac{\widehat{COV}_{p(i,j)}}{\sqrt{\sigma_{p(i)}^2 \times \sigma_{p(j)}^2}}, \quad (i \neq j)$$

$$r_G = \frac{\widehat{COV}_{a(i,j)}}{\sqrt{\sigma_{a(i)}^2 \times \sigma_{a(j)}^2}}, \quad (i \neq j)$$

여기서,  $\sigma_p^2$  는 표현형 분산 (Phenotypic variation),  $\sigma_a^2$ 는 상가적 유전분산 (Additive genotypic variation) 이며,

$COV_{p(i,j)}$  와  $COV_{a(i,j)}$  는 두 형질 i 와 j 간의 표현형 공분산 (Phenotypic covariance) 및 유전 공분산 (Genotypic covariance) 이다.

## 결과 및 고찰

### 1. 전체 평균과 분산분석

본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 부화 후 30개월령 각장, 각폭, 중량의 각 성장형질별 표현형의 전체 평균 등을 Table 1에 나타내었다. 각장, 각폭, 중량의 전체 평균은 각각 80.28 mm, 52.79 mm 및 62.99 g로 조사되었으며, 각 형질의 최소값과 최대값의 경우 각장은 각각 33.00 mm 및 110.80 mm, 각폭은 24.00 mm 및 73.40 mm 그리고 중량은 4.5 g 및 148.90 g로 나타났다. 정규분포의 지표 중에 하나인 첨도 (kurtosis) 와 왜도 (skewness) 는 그 절댓값이 각각 7미만과 3미만이면 정규분포에 부합되는 것으로 나타났다 (Park et al., 2021). 본 연구에서 조사된 각 성장형질별 첨도와 왜도의 값은 각장이 각각 -0.22 및 -0.27, 각폭의 경우 각각 -0.43 및 -0.28 그리고 중량은 -0.08 및 0.35로 나타나 정규분포에 부합하는 것으로 나타났다. 변이계수 (CV, Coefficient of variation) 는 자료 또는 확률분포의 산포를 측정하는 표준화된 측도이며, 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 상대표준편차 (relative standard deviation, RSD) 라고 하기도 한다 (Park et al., 2020). 변이계수는 측정 단위가 다른 자료들의 상대적 변동성을 비교하는 데 용이하며, 그 값이 작을 수록 평균에 가깝게 분포하고 있다는 것을 의미한다 (Park et al., 2013). 본 연구에서 조사된 각 성장형질의 변이계수의 경우 각장과 각폭은 각각 0.119 (11.9%) 와 0.127 (12.7%) 로 비슷하였으며, 중량의 경우 0.321 (32.1%) 로 각장 및 각폭에 비해 중량의 자료 변동성이 가장 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 수온, 먹이 및 수질 등 최적의 사육환경에서의 성장과는 차이가 있으며, 본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단은 양식현장과 최대한 유사한 사육환경에서 집단의 유전적 다양성을 유지하여 선발육종을 위한 철저한 계획 교배로 생산되어 사육되었다.

본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 각 성장형질에 대

**Table 2.** Source of the variation, degree of freedom (df), mean square and test of significance for growth traits at the age of 30-months for all generation

Source	df	Shell length	Shell width	Total weight
Generation	4	161564.9*	81480.0*	572065.3*
Sex	1	5259.9*	2514.3*	47571.6*
Error	12867	40.2*	19.5*	228.4*

\* : P < 0.001

**Table 3.** Least-square means and standard errors for growth traits of the Pacific, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months by generation

Generation	Shell length (mm)	Shell width (mm)	Total weight (g)
F1	60.28 <sup>e</sup> ± 0.540	41.61 <sup>e</sup> ± 0.376	28.04 <sup>d</sup> ± 1.292
F2	71.67 <sup>d</sup> ± 0.095	46.38 <sup>d</sup> ± 0.066	47.18 <sup>c</sup> ± 0.227
F3	83.20 <sup>c</sup> ± 0.120	55.97 <sup>c</sup> ± 0.084	68.28 <sup>b</sup> ± 0.288
F4	84.04 <sup>b</sup> ± 0.118	55.36 <sup>b</sup> ± 0.082	67.96 <sup>b</sup> ± 0.283
F5	88.90 <sup>a</sup> ± 0.125	58.21 <sup>a</sup> ± 0.087	80.99 <sup>a</sup> ± 0.299

Means in the same column with different letter are statistically significant at 5% level of significance

**Table 4.** Least-square means and standard errors for growth traits of the Pacific, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months by sex

Sex	Shell length (mm)	Shell width (mm)	Total weight (g)
Female	78.18 <sup>a</sup> ± 0.127	51.89 <sup>a</sup> ± 0.088	60.17 <sup>a</sup> ± 0.302
Male	76.88 <sup>b</sup> ± 0.133	51.00 <sup>b</sup> ± 0.093	56.29 <sup>b</sup> ± 0.317

Means in the same column with different letter are statistically significant at 5% level of significance

한 세대 및 성의 등분산성에 대한 t-검정을 분석한 결과 분산이 같지 않다는 결과를 보였다. 성장형질인 각장, 각폭, 중량에 영향을 미치는 세대 및 성의 효과를 추정하기 위해 SAS Package의 GLM (general liner model) 으로 유의성을 검정한 결과, 각장, 각폭 및 중량의 세 형질 모두 고도의 유의성 (P < 0.001) 이 인정되었다 (Table 2).

## 2. 세대의 효과

Table 3에는 분산분석 결과를 바탕으로 북방전복 육종집단의 세대의 효과에 대한 최소제곱평균과 그 표준오차를 표시하였으며, 세대가 경과함에 따라 모든 성장형질이 유의적으로 증가하였다. 각장의 경우 5세대 (F5) 가 88.90 mm로 1세대 (F1) 의 60.28 mm보다 28.62 mm (47.5%) 향상 되었으며, 각폭의 경우 5세대 (F5) 가 58.21 mm로 1세대 (F1) 의 41.61 mm보다 16.60 mm (39.9%) 향상 되었다. 특히, 중량의 경우 5세대 (F5) 가 80.99 g로 1세대 (F1) 의 28.04 g보다

52.95 g (188.8%) 향상되었다. 이와 같이 세대가 경과함에 따라 각장, 각폭, 중량의 각 성장형질이 유의적으로 증가 (p < 0.05) 를 나타낸 것은 철저한 혈통관리와 집단의 과학적인 유전능력평가를 바탕으로 다년 간의 선발과 계획교배에 의한 결과로 사료된다.

## 3. 성의 효과

Table 4에는 분산분석 결과를 이용하여 본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단 전체의 성의 효과에 있어서 최소제곱평균과 그 표준오차를 표시하였다. 각장의 경우 암컷이 78.18 mm로 수컷의 76.88 mm보다 1.3 mm 더 길었으며, 각폭의 경우 암컷이 51.89 mm로 수컷의 51.00 mm보다 0.89 mm 길었다. 중량의 경우 암컷이 60.17 g로 수컷의 56.29 g보다 3.88 g 더 무거웠다. 이와 같이 북방전복에 있어서 암컷과 수컷의 유의적인 차이를 보고한 연구결과를 살펴보면, Park *et al.* (2012) 은 부화 후 31개월령 북방전복의 성장형질에 대한 선

**Table 5.** Heritability for growth traits of the Pacific, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months

Item	Shell length	Shell width	Total weight
Genetic variance	20.53	9.02	71.41
Residual variances	23.92	10.21	135.19
Total variances	44.45	19.23	206.60
heritability	0.461	0.469	0.346

**Table 6.** Genetic and phenotypic correlations among growth traits of the Pacific, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months

Traits	Shell length	Shell width	Total weight
Shell length		0.938	0.897
Shell width	0.961		0.893
Total weight	0.953	0.935	

Upper diagonal : genetic correlation coefficient, bottom diagonal : phenotypic correlation coefficient

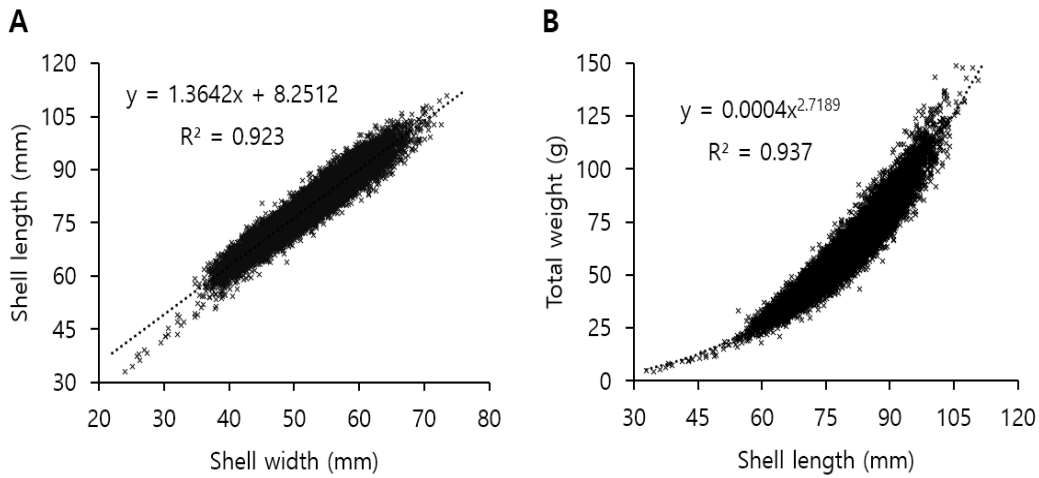
발반응 추정에 관한 연구에서 각장, 각폭, 중량 모든 형질에서 암컷이 수컷보다 각각 2.50 mm, 1.57 mm 및 5.46 g로 더 컸다고 보고하였으며, Park *et al.* (2016) 은 북방전복을 대상으로 성별에 따른 성장형질 연구에서 부화 후 30개월령 각장, 각폭, 중량 모든 형질에서 암컷이 수컷보다 각각 4.20 mm, 3.50 mm 및 12.60 g로 더 컸다고 보고하여 본 연구의 결과와 일치하였다. 그리고, Park *et al.* (2020) 의 북방전복 성장형질의 유전적 개량량 추정에 관한 연구에서 부화 후 30개월령 각장, 각폭, 중량 모든 형질에서 암컷이 수컷보다 각각 1.22 mm, 0.86 mm 및 4.81 g로 더 컸다고 보고하였으며, Kim *et al.* (2022) 은 북방전복의 부화 후 30개월령 성장형질 유전모수 및 선발효과 추정 연구에서 각장, 각폭, 중량 모든 형질에서 암컷이 수컷보다 각각 2.40 mm, 1.50 mm 및 6.20 g로 더 컸다고 보고한 연구 결과와도 일치하여 성장형질 표현형에 있어 암수 간의 유의적인 차이가 존재하였다.

#### 4. 유전모수 및 유전력

Table 5에는 본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 부화 후 30개월령 성장형질에 대한 유전모수와 유전력을 표시하였다. 성장형질과 같은 표현형은 환경요인과 유전의 공동 작용으로 나타나는데 유전의 영향을 많이 받는 형질과 유전의 영향을 적게 받는 형질이 있으며, 이 형질들의 변이를 일으키는데 있어서 환경요인과 유전의 상대적인 중요성을 유전력으로 나타낼 수 있다 (Park *et al.*, 2013). 본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 부화 후 30개월령 성장형질의 유전력을 추정한 결과 각장, 각폭, 중량이 각각 0.461, 0.469 및 0.346으로 중·고도의 유전력을 보여 가계 내 개체선발을 이용하는 것이 개량효과에 유리할 것으로 사료된다. 일반적으로 유전력의 범위는

0-1이며, 일반적으로 0.2 이하를 저도의 유전력, 0.2-0.4의 범위는 중도의 유전력 그리고 0.4 이상을 고도의 유전력이라고 한다 (Park *et al.*, 2020). 경제형질의 유전력이 낮을 때에는 가계선발이 유리하고 유전력이 높을 때에는 개체선발이 유리하다. 이는 유전력이 낮은 형질의 경우 표현형 차이가 주로 환경요인에 의하여 나타나므로 개체의 표현형에만 근거하여 유전자형을 정확하게 추정하기 어렵기 때문이다 (Park *et al.*, 2020). 전복을 대상으로 유전력을 추정한 연구를 살펴보면 Jonasson *et al.* (1999) 은 양식산 붉은 전복을 대상으로 각장의 유전력이 부화 후 18개월령에서 0.27 그리고 24개월령에서 0.34로 보고한 바 있으며, Lucas *et al.* (2006) 은 개체 모형으로 성장형질에 대한 유전력을 추정한 결과 각장이 0.48, 각폭은 0.38 그리고 중량은 0.36으로 보고하였다. Choe *et al.* (2009) 은 9개월령 북방전복을 대상으로 각장은 0.29, 각폭이 0.29 그리고 중량은 0.31로 중도의 유전력을 보고한 바 있으며, Park *et al.* (2013) 은 선발 3세대 북방전복의 18개월령 각장은 0.370, 각폭이 0.382 그리고 중량의 유전력 0.367로 보고하였다. Park *et al.* (2020) 은 육종가 기반 북방전복 성장형질의 유전적 개량량 추정에 관한 연구에서 부화 후 18개월령에서 각장, 각폭, 중량이 각각 0.253, 0.261 및 0.282 그리고 부화 후 30개월령에서는 각각 0.303, 0.354 그리고 0.324로 중도의 유전력을 보고하였다. 이처럼 유전력은 시대, 대상, 집단, 환경요인 및 분석방법 등에 따라 다양하게 추정되며, 개량 대상형질의 유전적 개량량을 예측하여 육종계획을 수립하는 데 중요한 자료로 활용되기 때문에 정확도 향상을 위해서는 모든 혈통기록과 정확한 표현형 자료가 축적되어야 한다.

Table 6에는 본 연구에서 조사된 부화 후 30개월령 북방전



**Fig. 1.** Relationship between each traits for phenotypic value. **A:** Shell length and shell width, **B:** Shell length and total weight.

복의 성장형질인 각장, 각폭, 중량의 표현형 및 유전적 상관계수를 표시하였다. 각 성장형질에 대한 표현형 상관계수는 0.935-0.961 그리고 유전적 상관계수가 0.893-0.938로 정의 상관관계를 나타내어 하나의 성장형질 개량만으로도 다른 두 성장형질도 동시에 개량이 될 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단 (F1-F5) 전체 자료를 이용하여 각장과 각폭, 각장과 중량의 표현형 상관관계를 산점도로 표시한 결과, 각장 (y축) 과 각폭 (x축) 의 상관관계는  $y = 1.3642x +$

$8.2512$  ( $R^2 = 0.923$ ) 의 1차 방정식의 추세선으로 나타났으며 (Fig. 1A), 중량 (y축) 과 각장 (x축) 의 상관관계는  $y = 0.0004x^{2.7189}$  ( $R^2 = 0.937$ ) 의 거듭제곱식의 추세선으로 나타났다 (Fig. 1B).

**5. 육종가, 선발의 정확도 및 유전적 변화추세**

Table 7에는 본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 부화 후 30개월령 북방전복의 성장형질에 대한 세대별 육종가와 표

**Table 7.** Accuracy of breeding value for growth traits of the Pacific, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months by generation

Traits <sup>1)</sup>	Generation	EBV <sup>2)</sup>		SE <sup>3)</sup>		Accuracy		
		Min	Max	Min	Max	Average	Min	Max
SL (mm)	F1	-19.76	7.57	2.09	3.12	0.797 ± 0.034	0.726	0.887
	F2	-8.10	10.52	1.91	3.08	0.813 ± 0.017	0.733	0.907
	F3	-6.38	12.67	2.02	2.98	0.808 ± 0.021	0.753	0.895
	F4	-5.97	13.21	2.00	2.91	0.805 ± 0.020	0.766	0.897
	F5	-1.65	15.52	2.62	2.92	0.801 ± 0.011	0.765	0.816
SW (mm)	F1	-12.7	5.23	1.38	2.06	0.799 ± 0.033	0.729	0.888
	F2	-5.12	8.40	1.26	2.03	0.815 ± 0.017	0.737	0.908
	F3	-4.86	8.84	1.33	1.97	0.810 ± 0.021	0.756	0.896
	F4	-3.76	10.45	1.32	1.92	0.807 ± 0.020	0.769	0.898
	F5	-1.08	11.45	1.73	1.93	0.803 ± 0.011	0.768	0.818
TW (g)	F1	-23.15	9.14	4.26	6.46	0.749 ± 0.047	0.645	0.864
	F2	-13.75	21.05	3.91	6.37	0.776 ± 0.021	0.657	0.887
	F3	-11.15	24.40	4.13	6.10	0.766 ± 0.027	0.692	0.873
	F4	-8.67	33.24	4.07	6.03	0.762 ± 0.026	0.700	0.876
	F5	-3.74	38.92	5.25	6.07	0.759 ± 0.019	0.696	0.784

<sup>1)</sup>SL : shell length, SW : shell width, TW : total weight, <sup>2)</sup>EBV : estimated breeding value, <sup>3)</sup>SE : standard error

**Table 8.** Correlation between phenotypic and breeding value for growth traits shell length (SL), shell width (SW) and total weight (TW) of the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months

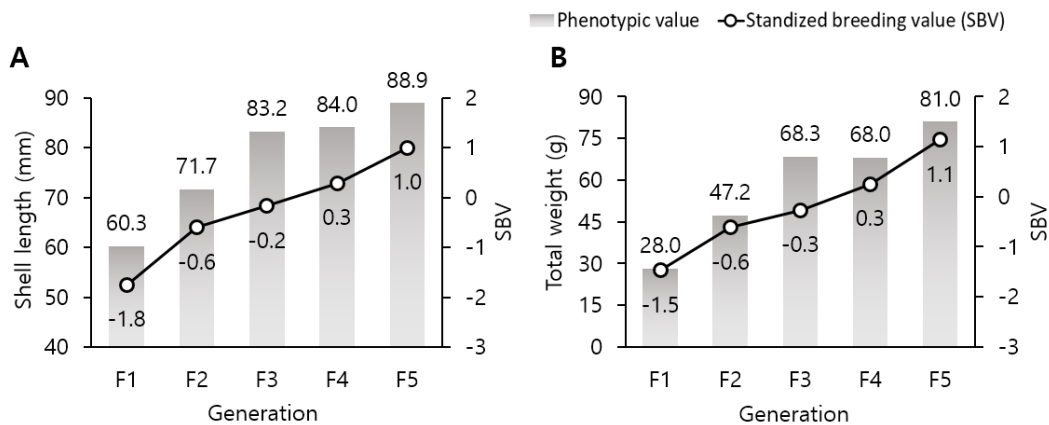
Sex	Pearson correlation			Spearman correlation		
	SL	SW	TW	SL	SW	TW
Female	0.857	0.830	0.836	0.856	0.832	0.841
Male	0.853	0.820	0.815	0.850	0.821	0.816
Total	0.853	0.823	0.822	0.851	0.825	0.827

준오차의 범위 그리고 육종가의 정확도를 표시하였다. 각장 육종가는 각 세대별로 -19.76-15.52 mm의 범위로 추정되었으며, 정확도는 최소 0.726 (72.6%) 에서 최대 0.907 (90.7%) 로 추정되었다. 각폭 육종가의 경우 각 세대별로 -12.70-11.45 mm의 범위로 추정되었으며, 정확도는 최소 0.729 (72.9%) 에서 최대 0.908 (90.8%) 로 추정되었다. 중량의 육종가는 -23.15-38.92 g의 범위로 추정되었으며, 정확도는 최소 0.645 (64.5%) 에서 최대 0.887 (88.7%) 로 추정되었다. 본 연구에서는 표현형과 혈통정보를 기반으로 각 성장형질의 육종가를 추정하였으며, 향후 유전체 정보를 추가한다면 육종가의 정확도는 더욱 향상될 것으로 판단된다.

Table 8에는 본 연구에서 조사된 부화후 30개월령 북방전복 육종집단의 성장형질인 각장, 각폭, 중량의 표현형가와 추정된 육종가를 이용해 피어슨 상관계수와 스피어만 상관계수를 표시하였다. 암컷에 있어서 각장, 각폭 그리고 중량의 표현형가와 육종가의 피어슨 단순 상관계수는 각각 0.857, 0.830 및 0.836으로 나타났고, 스피어만의 순위 상관계수는 각각 0.856, 0.832 및 0.841로 나타났다. 수컷에 있어서 각장, 각폭 그리고 중량의 표현형가와 육종가의 피어슨 단순 상관계수는 각각 0.853, 0.820 및 0.815로 나타났고, 스피어만의 순위 상관계수의 경우 각각 0.850, 0.821 및 0.816으로 나타났다. 암컷과 수컷 모두의 경우 각장, 각폭, 중량의 표현형가와 육종가의 단순 상관계수는 0.853, 0.823 및 0.822로 나타났고, 순위

상관계수는 각각 0.851, 0.825 및 0.827로 나타났다. 이와같이 성장형질의 표현형가와 추정된 육종가의 상관관계로 선발에 대한 정확도를 추측할 수 있는데, 본 연구에서와 같이 모든 형질에 있어서 표현형가와 육종가가 0.8 (80%) 이상의 비교적 높은 상관계수를 보여 북방전복을 대상으로 혈통 기반의 선발육종이 체계적으로 추진되었다고 판단된다.

본 연구에서 조사된 북방전복 육종집단의 성장형질인 각장과 중량에 대한 유전적 변화 추세를 표시하였다 (Fig. 2). 측정단위가 서로 다른 각장과 중량에 대한 유전적인 능력을 비교하기 위해 평균이 0이고 편차가 ± 1이 되는 표준화 육종가 (standardized breeding value) 를 계산하였다. 표준화 육종가는 선발 시 개체 또는 가계 간의 우선순위를 결정하는 데 활용할 수 있으며 (Park *et al.*, 2013), 육종대상 형질의 개량 방향에 따라 적절한 기준치를 고려하여 선발지수식을 설정하는 데에도 이용된다. 본 연구에서 조사된 북방전복은 유전자 표지를 이용한 선발육종을 통해 개량된 육종집단으로서 3년 주기로 후대 세대를 생산하여 왔다. 2005년 생산된 1세대 (F1) 부터 2017년 생산된 5세대 (F5) 까지 세대별 각 성장형질에 대한 육종가를 추정하고 표준화 하여 비교한 결과 각장 및 중량 모두 세대가 경과함에 따라 유전적으로 뚜렷한 증가 추세를 보였다. 이는 체계적이고 과학적인 선발과 교배를 통해 선발육종이 이루어지고 있음을 시사한다. 체계적인 선발육종을 위해서는 우선적으로 유전적 다양성이 확보된 변이가 큰 집단을 고려해



**Fig. 2.** Genetic trend of growth traits by generation. **A:** shell length, **B:** total weight.

야 하며 (Su *et al.*, 1996), 친자확인 기술과 더불어 정확한 유전능력평가를 통해 육종 대상형질에 대한 유전모수와 육종가를 추정하여 선발과 교배에 이용하는 기술 또한 중요하다. 산란량이 많고 표현형적 변이가 큰 수산동물에 있어서 선발육종은 개량을 위한 가장 확실하고 효과적인 육종 방법이다. 육종의 실질적인 목적은 유전적 개량을 통해 표현형가와 육종가의 상관관계를 높이는 것이며, 이를 위해서는 최적의 사육환경을 제공하고 체계적인 혈통관리를 통해 유전모수와 육종가를 정확하게 추정하여 후대 생산을 위한 모패 선발에 적절히 고려하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구의 결과와 같이 후대 생산을 위한 모패 선발의 정확도를 높이기 위해서는 각 성장형질에 영향을 미치는 성 등 다양한 환경요인의 영향을 고려해야 하며, 집단의 유전적 다양성 유지를 통해 근친화를 최소화해야 한다. 또한 개량하고자 하는 형질 간의 유전적인 상관관계와 더불어 추정된 육종가를 선발과 교배에 적절히 이용한다면 효과적인 유전적 개량도 도모할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 북방전복은 한류성 품종으로 생태적인 특성상 성장이 느려 오랜 양정 기간이 소요되어 성장 개량을 위한 선발 육종연구가 필수이며, 최근 북방전복의 유전체 정보를 이용한 육종연구도 진행되고 있어 향후 지속적인 우량품종 개발이 기대된다.

## 요 약

본 연구에서는 북방전복 육종집단의 성장형질에 영향을 미치는 성 등 환경요인의 효과와 세대별 유전적 변화 추세를 추정하기 위한 목적으로 2005년부터 2017년까지 생산된 북방전복 육종집단 (F1-F5) 12,783마리에 대한 30개월령 각장, 각폭, 중량의 표현형자료와 혈통자료를 이용하였다. 성장형질인 각장, 각폭, 중량에 대한 유전모수, 유전력 및 육종가를 추정하기 위해 세대와 성을 고정효과로 처리하고 AIREMLF90과 BLUPF90 프로그램을 이용하였다. 부화 후 30개월령에서 각장, 각폭, 중량의 전체평균은 각각 80.28 mm, 52.79 mm 및 62.99 g로 조사되었으며, 중량의 변이계수가 (0.321) 32.1%로 변이가 가장 크게 나타났다. 표현형에 있어서 암컷이 수컷보다 유의적으로 높았으며, 각장, 각폭, 중량의 유전력은 각각 0.461, 0.469, 0.346의 유전력을 보였다. 성장형질 간의 유전적 상관관계수의 범위는 0.893-0.938로 높은 정의 상관관계를 나타내었다. 각장 (SL) 과 각폭 (SW) 의 표현형 상관은  $SL = 1.3642SW + 8.2512$  ( $R^2 = 0.923$ ), 그리고 중량 (TW) 과 각장 (SL) 의 표현형 상관은  $TW = 0.0004SL^{2.7189}$  ( $R^2 = 0.937$ ) 의 추세선으로 추정되었다. 혈통정보와 표현형 기록을 이용하여 각장, 각폭, 중량의 육종가를 추정된 결과 평균 정확도는 각각 0.805 (80.5%), 0.807 (80.7%) 및 0.762 (76.2%)

로 비교적 높았다. 표현형가와 추정된 육종가의 상관관계로 선발에 대한 정확도를 추정할 수 있는데, 본 연구에서와 같이 모든 형질에 있어서 표현형가와 육종가가 0.80 (80%) 이상의 비교적 높은 상관계수를 나타내어 혈통 기반의 선발육종이 체계적으로 추진되었다고 판단된다. 성장형질인 각장과 중량의 유전적인 변화를 추정된 결과 세대가 경과함에 따라 유전적으로 뚜렷한 증가 추세를 보였다. 모패 선발의 정확도 향상과 후대의 유전적 개량을 위해서는 집단의 유전적 다양성 유지를 통한 근친의 최소화가 특히 중요하며, 집단의 체계적인 혈통관리와 더불어 유전모수와 육종가 추정을 통한 지속적인 육종연구가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부 국립수산물과학원 (양식생물 육종품종 개발 및 산업화, R2023020) 의 지원에 의해 연구되었습니다.

## REFERENCES

- Arai Katsutoshi and Okumura Sei-Ichi (2013) *Aquaculture-oriented genetic researches in abalone: Current status and future perspective. African Journal of Biotechnology*, **26**: 4044-4052.
- Argue, B.J., Arce, S.M., Lotz, J.M. and Moss, S.M. (2002) Selective breeding of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) for growth and resistance to taura syndrome virus. *Aquaculture*, **204**: 447-460.
- Choe, M.K., Yang, S.G., Won, S.H., Park, C.J., Han, S.J., and Yeo, I.K. (2009) Estimation of genetic parameters for growth-related traits in 9-month old of two Korean abalone subspecies, *Haliotis discus hannai* and *H. discus discus*, by using Multiple traits of animal model. *The Korean Journal Malacology*, **24**(2): 121-130.
- Gjerde, B., Terjesen, B.F., Barr, Y., Lein, I., Thorland, I. (2004) Genetic variation for juvenile growth and survival in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture*, **236**: 167-177.
- Groeneveld, E. and Kovac, M. (1990) A note on multiple solutions in multivariate restricted maximum likelihood covariance component estimation. *Journal of Dairy Science*, **73**: 2221-2229.
- Jonasson, J., Stefansson, S.E., Gudnason, A. and Steinarsson, A. (1999) Genetic variation for survival and shell length of cultured red abalone (*Haliotis rufescens*) in Iceland. *Journal of Shellfish Research*, **18**(2): 621-625.
- Kim, H.J., Yang, H.R. and Park, J.W. (2022) Estimation of genetic parameter and breeding effect for growth traits of Pacific abalone, *Haliotis discus hannai*. *The Korean Journal Malacology*, **38**(4): 203-210.
- Kubu, P.D., Appleyard, S.A. and Elliott, N.G. (2007)

- selective breeding greenlip abalone (*Haliotis aevigata*): Preliminary result and issue. *Journal of Shellfish Research*, **26**: 821-824.
- Lucas, T., Macbeth, M., Degnan, S.M., Knibb, W. and Degnan, B.M. (2006) Heritability estimates for growth in the tropical abalone *Haliotis asinina* using microsatellites to assign parentage. *Aquaculture*, **259**: 146-152.
- Misztal I., Tsuruta S., Strabel T., Auvray B., Druet T. and Lee D. (2002) BLUPF90 and related program (BGF90). Proc. 7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Montpellier, France, CD-Rom Communication. 28: 1-7.
- Olesen, I., Gjedrem, T., Bentsen, H.B., Gjerde, B. and Rye, M. (2003) Breeding programs for sustainable Aquaculture. *Journal of Applied Aquaculture*, **13**: 179-204.
- Park, C.J., Lee, J.H., Noh, J.K., Kim, H.C., Park, J.W., Hwang, I.J. and Kim, S.Y. (2012) Growth of Pacific abalone, *Haliotis discus hannai*, using selection breeding techniques. *The Korean Journal Malacology*, **28**(4): 343-347.
- Park, J.W., Park, C.J., Lee, J.H., Noh, J.K., Kim, H.C., Hwang, I.J. and Kim, S.Y. (2013) Estimation of Family Variation and Genetic Parameter for Growth Traits of Pacific Abalone *Haliotis discus hannai* on the 3th Generation of Selection. *The Korean Journal Malacology*, **29**(4): 325-334.
- Park, C.J., Park, J.W., Kim, B.R., Jeong, K.H., Kim, Y.J., Son, Y.S. and Kim, K.K. (2016) Estimation of genetic parameter and growth traits by sex of pacific abalone *Haliotis discus hannai*. *The Korean Journal Malacology*, **32**(4): 249-254.
- Park, J.W., Park, C.J., Lee, D.I., Jung, H.S., Kim, H.j., Kim, J.L. and Kim, W.J. (2020) Estimation of Genetic Improvement Based on the Breeding Values of Growth Traits of the Abalone *Haliotis discus hannai*. *Korean Journal Fisheries and Aquatic Sciences*, **53**(4): 544-550.
- Park, J.W., Lee, D.I., Jung, H.S., Kim, J.L., Yang, H.R. and Lee, J.H. (2021) Estimation of Genetic Parameters and Improvements for Growth Traits of Selected Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*. *The Korean Journal Fish Aquat Sci.*, **54**(6): 974-981.
- Symonds, J.E., Mossb, G., Jopsonc, N.B., Robertsd, R., Birsse, J., Heathb, P., Walkera, S.P., Andersonf, R.M., McEwanf, K.M. and Amerc, P.R. (2012) Family-based selective breeding of New Zealand Abalone, *Haliotis iris*: challenges and opportunities. *New Zealand Society of Animal Production*, **72**: 216-221.
- SU, G.S., Liljedahl, L.E., Gall, G.A.E. (1996) Genetic and environmental variation of body weight in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, **144**: 71-80.
- Viana, M.T. (2002) Abalone Aquaculture, An overview. *World Aquaculture*, pp 34-39.
- Zheng H., Zhang G., Liu X. and Guo X. (2006) Sustained response to selection in an introduced population of the hermaphroditic bay scallop *Argopecten irradians irradians* Lamarck (1819). *Aquaculture*, **255**: 579-585.

