

북방전복 (*Haliotis discus hannai*) 의 성별에 따른 성장형질 및 유전모수 추정

박철지, 박종원, 김보라, 정규현, 김영진, 손윤석, 김경길

국립수산과학원 육종연구센터

Estimation of Genetic Parameter and Growth Traits by Sex of Pacific Abalone, *Haliotis discus hannai*

Choul-Ji Park, Jong-Won Park, Bo-Ra Kim, Kyu Hyeon Jeong, Young Jin Kim, Yoon Suk Son
and Kyung Kil Kim

Genetics and Breeding Research Center, NIFS, Gyeongsangnam-do Geoje, 53334, Korea

ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate genetic parameter and growth traits by sex of Pacific abalone, *Haliotis discus hannai*. The abalone 10 family produced using 1:1 mating system of male and female for analyses of sex ratio and growth traits (shell length, shell width, and total weight) by sex. Overall mean in phenotypic traits at 30-month-old showed 85.01 mm of shell length, 57.49 mm of shell width and 73.34 g of total weight respectively. The sex ratio (female : male) was 1:0.93 (n = 191:177). The values of growth traits by sex showed significant difference (P < 0.05). The each value of female growth traits were shown to be higher than the values of male growth traits. The heritability of growth traits by sex were estimated that the heritability of female growth traits are higher than male that. The results suggest a possibility of improving the growth of cultured abalone using selection breeding by sex.

Keywords: Abalone, Selective breeding, Sex, Genetic parameter, Growth traits

서 론

북방전복 (*Haliotis discus hannai*) 은 우리나라의 전복 양식생산량의 대부분을 차지하는 중요한 양식품종으로 2015년에는 양식산 전복 10,494톤을 생산하여 세계 2위의 전복 양식생산국으로 세계의 주목을 받고 있다 (KMI, 2015). 그러나 전복류는 성장속도가 느려 상품이 되기까지 장기간의 양식 기간을 필요로 하는 이유로 양식산업의 정착에 많은 어려움을 가지고 있다. 따라서 전복 양식산업에 있어 육종연구는 매우 중요하게 취급되어지고 있으며, 전복의 성장 및 질병내성을 위한

다양한 육종연구가 국내외적으로 수행되고 있다 (Hara, 1990; Hara and Kikuchi, 1992; Vinna, 2002; Park *et al.*, 2012). 특히 선발육종은 양식생물의 생산성 향상을 위한 가장 일반적이고 효과적인 접근 방법으로서 많은 연구가 보고 되어 있다 (Argue *et al.*, 2002; Gjerde *et al.*, 2004; Gjedrem, 1983, 1997, 2000).

선발육종을 통한 경제형질의 지속적인 개량을 위해서는 합리적이고 과학적인 선발을 필요로 한다. 선발에 의한 개량효과는 얼마나 정확하게 그 개체의 육종가를 추정할 수 있는가에 따라 좌우되며, 육종가를 정확히 추정하기 위해서는 육종하고자 하는 경제형질에 대한 유전력 및 유전상관과 같은 유전모수를 정확하게 추정하는 것이 매우 중요하다.

선발육종을 성공적으로 수행되기 위해서는 무엇보다도 먼저 유전적 다양성을 가진 변이가 큰 집단 선택이 매우 중요하다 (Su *et al.*, 1996). 또한, 선발육종을 하기 위해서는 성장 및 질병내성과 같은 중요한 경제형질 등을 선택하여야 하는데, 그 중에 성별에 따른 성장차이를 크게 나타내는 넉치 (Kim *et al.*, 2007), 털라피아 (Palada-de Vera *et al.*, 1993) 등의 수산생

Received: December 2, 2016; Revised: December 19, 2016;
Accepted: December 30, 2016
Corresponding author : Choul-Ji Park
Tel: +82 (55) 639-5812, e-mail: choulji@korea.kr
1225-3480/24634

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.

물에 있어서는 성별이 매우 중요한 선발형질이 될 수 있다.

전복류는 일반적으로 자연계에 있어 암컷과 수컷의 성비가 1:1이며 성장에 있어서도 암컷과 수컷의 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 알려져 있다 (Weber and Gieses, 1969; Young, 1970; Wilson and Schiel, 1995; Capinpin *et al.*, 1998; Najmudeen and Victor, 2004). 하지만 최근 전복 양식장에서는 암컷 및 수컷의 성비의 불균형 및 성에 따른 성장형질의 차이가 나타난다고 한다. 그러나 실제로 암수 1:1 교배를 통하여 성비 및 성장을 비교한 실증적인 실험은 보고되어 있지 않다.

본 연구는 고부가가치의 양식 산업 중으로 부각되고 있는 복방전복을 대상으로 암수 1:1 교배실험을 실시하고 성별에 따른 성장형질의 표현형 측정과 유전모수를 분석하여 복방전복의 성별에 따른 성장형질의 변이를 이용한 선발육종연구의 기초 자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 가계생산 및 성장형질 계측

복방전복의 성별에 따른 성장형질을 분석하기 위하여 2011년 6월 2일 암수 1:1 교배로 10가계를 생산하였다. 10가계는 같은 날 동시 산란 및 수정을 하였고, 환경요인에 대한 영향을 최소화하기 위해 동일한 수조환경에서 혼합사육 관리하였으며, 가계 및 개체식별은 DNA 마커를 이용한 친자확인 실험을 통하여 확인하였다. 사육관리는 전복양식 현장에서와 같이 종자 생산시기에 2회 선별 (size selection), 양성기간에 2회 선별을 실시하였으며, 30개월째 가계별 성비율 및 성별에 따른 성장형질을 확인하였다. 성별은 육안으로 생식소가 유백색이면 수컷, 암녹색이면 암컷으로 판정하였다.

수정 후 30개월째 성장형질 측정은 정확하고 세밀한 측정을 위해 고정밀 디지털 버니아캘리퍼스와 전자저울을 이용하여 각장과 각폭은 0.01 mm 단위, 중량은 0.01 g 단위로 측정하였으며, 유전모수 추정에 있어서 측정 자료의 이상치 제거를 위해 표준편차의 ± 3 배의 자료는 분석에서 제외하였다.

2. 통계분석방법

각 형질에 대한 가계별 등분산성에 대한 t-검정을 실시하고 각장, 각폭 및 중량에 대한 성의 효과를 추정하기 위해 SAS Package의 GLM (General linear model) 으로 분산분석을 실시하였으며, 최소자승평균치 간의 유의성 검정을 위해 $H_0 : LSM(i) = LSM(j)$ 와 같은 귀무가설을 유의수준 5%로 Pairwise T 검정을 하였다. 여기서, $LSM(i(j))$ 는 $i(j)$ 번째 효과의 최소자승평균치이다.

또한, 암컷 및 수컷 각각에 있어 각장, 각폭 및 중량에 대한

유전모수를 추정하기 위해 생산시기를 고정효과로 처리하였으며, EM-REML (Expectation maximization-restricted maximum likelihood) Algorithm을 전산 프로그램화한 REMLF90 (Misztal, 1990) 을 이용하여 최적선형불편예측법 (Best linear unbiased prediction : BLUP) 에 의해 다음과 같은 다형질 개체모형을 이용하였다.

$$y_{ijk} = \mu_i + BY_{ij} + a_{ijk} + e_{ijk}$$

여기서, y_{ijk} 는 i 번째 형질에서 j 번째 생산시기에 속하는 k 번째 개체에 대한 측정치, μ_i 는 i 번째 형질의 전체 평균, BY_{ij} 는 i 번째 형질의 j 번째 생산시기의 효과 ($j = 1, 2$), a_{ijk} 는 개체에 대한 임의효과 $-N(0, G)$ 그리고 e_{ijk} 는 임의오차 $-N(0, R)$ 이다.

G 는 형질들 사이의 상가적 유전-공분산을 나타내며, R 은 임의오차의 분산-공분산이고, 추정된 값이 지역 최대값 (Local maximum) 으로 수렴하는 것을 방지하기 위하여 최종적으로 구해진 추정치를 시작 값으로 하여 그 차이가 10^{-9} 이하로 되는 경우를 수렴 값으로 결정하였다. 구해진 분산-공분산 값을 이용하여 상가적 유전분산 (σ_a^2) 과 환경 분산 (σ_e^2) 에 의한 유전력 (h^2) 계산은 다음식과 같이 구하였다 (Groeneveld and Kovac, 1990).

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

집단의 확률분포에 대한 정규성 검정 (Normality test) 을 위해 SAS Package 의 Univariate proceduer를 이용하였으며, 조사된 각 형질 간의 표현형 상관계수 (r_P), 및 유전 상관계수 (r_G) 는 아래와 같은 공식을 이용하였다.

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

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

여기서, σ_p^2 와 σ_a^2 는 각각 표현형 분산과 상가적 유전분산, $COV_{p(i,j)}$ 와 $COV_{a(i,j)}$ 는 두 형질 i 와 j 간의 표현형 공분산과 유전 공분산이다.

Table 1. Overall means and standard deviations (STD) of shell length, shell width and total weight of the abalone, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months

Item	Shell length (mm)	Shell width (mm)	Total weight (g)
means ± STD	85.01 ± 6.478	57.49 ± 4.942	73.34 ± 17.97
maximum	101.6	70.1	128.9
minimum	66.1	43.5	30.1

Table 2. Least-square means and standard errors of shell length, shell width and total weight of the abalone, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months of 10 family

Family	Sex	n*	Shell length (mm)	Shell width (mm)	Total weight (g)
No. 1	F	44	89.4 ^a ± 0.89	61.7 ^a ± 0.66	84.1 ^a ± 2.66
	M	48	85.5 ^b ± 0.86	58.4 ^b ± 0.63	74.7 ^b ± 2.54
No. 2	F	27	83.7 ^a ± 0.79	57.0 ^a ± 0.63	69.6 ^a ± 2.10
	M	15	80.5 ^b ± 1.06	54.1 ^b ± 0.84	60.0 ^b ± 2.82
No. 3	F	11	88.2 ^a ± 1.65	60.8 ^a ± 1.28	86.1 ^a ± 5.04
	M	12	80.9 ^b ± 1.58	54.0 ^b ± 1.22	63.4 ^b ± 4.82
No. 4	F	11	85.2 ^a ± 2.27	60.0 ^a ± 1.48	78.2 ^a ± 5.35
	M	15	80.5 ^b ± 1.94	54.6 ^b ± 1.26	60.7 ^b ± 4.58
No. 5	F	12	86.2 ^a ± 1.77	56.5 ^a ± 1.38	74.6 ^a ± 4.63
	M	11	80.7 ^b ± 1.85	53.3 ^b ± 1.44	61.8 ^b ± 4.83
No. 6	F	11	88.7 ^a ± 2.18	60.6 ^a ± 1.46	88.2 ^a ± 6.28
	M	10	83.1 ^b ± 2.28	56.5 ^b ± 1.53	69.1 ^b ± 6.59
No. 7	F	12	89.5 ^a ± 1.73	59.5 ^a ± 1.26	81.5 ^a ± 4.99
	M	24	85.7 ^b ± 1.22	56.5 ^b ± 0.89	69.3 ^b ± 3.53
No. 8	F	9	86.8 ^a ± 1.72	56.1 ^a ± 1.20	78.7 ^a ± 4.42
	M	10	79.2 ^b ± 1.63	51.8 ^b ± 1.14	58.6 ^b ± 4.19
No. 9	F	20	84.3 ^a ± 1.11	56.1 ^a ± 0.77	71.7 ^a ± 2.66
	M	22	80.6 ^b ± 1.06	53.8 ^b ± 0.72	62.5 ^b ± 2.54
No. 10	F	34	87.4 ^a ± 1.06	59.8 ^a ± 0.77	82.3 ^a ± 2.92
	M	10	83.1 ^b ± 1.95	56.4 ^b ± 1.42	66.7 ^b ± 5.40
Total	F	191	87.0 ^a ± 0.44	59.2 ^a ± 0.33	79.4 ^a ± 1.22
	M	177	82.8 ^b ± 0.46	55.7 ^b ± 0.35	66.8 ^b ± 1.27

*n = individual number

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

결 과

1. 가계생산 및 사육관리

2011년 6월에 암컷 10마리와 수컷 10마리를 이용하여 1:1 교배실험을 실시하였으며, 10가계 각각의 부화 유생 20,000마리를 계수하여 수온 20℃에 4일간 혼합사육 후 적산수온 1030℃ 전후에 규조가 배양되어 있는 채묘수조에 채묘를 실시

하였다. 먹이는 부착규조를 주로 하였으며 1개월 이후부터 배합사료를 공급하여 관리하였다.

채묘 후 2회 선별작업을 실시하여 저성장 치패의 30%를 제거하였다. 또한 치패양성 기간 중에도 2회의 선별작업을 통하여 저성장 전복의 20%를 제거하였다. 그 결과 30개월째 총 368마리의 어미전복이 생존하였으며 평균각장은 85.01 mm, 평균각폭이 57.49 mm 그리고 평균중량은 73.34 g으로 조사

Table 3. Heritability (h^2), additive genetic variance (σ_a^2) and environmental variance (σ_e^2) of shell length, shell width and total weight in the abalone, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months

Item		Shell length	Shell width	Total weight
Female	σ_a^2	11.02	6.413	80.27
	σ_e^2	26.32	13.64	190.8
	h^2	0.295	0.320	0.296
Male	σ_a^2	5.495	2.945	27.76
	σ_e^2	23.08	12.95	155.3
	h^2	0.192	0.185	0.152

Table 4. Phenotypic and genetic correlations among shell length, shell width and total weight in the abalone, *Haliotis discus hannai* at the age of 30-months

Item		Shell length	Shell width	Total weight
Female	Shell length		0.920	0.934
	Shell width	0.852		0.918
	Total weight	0.897	0.874	
Male	Shell length		0.893	0.921
	Shell width	0.751		0.901
	Total weight	0.896	0.720	

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

되었다 (Table 1). 또한 각 형질에 대한 자료의 카이제곱 검정 결과 각장, 각폭 및 중량 모두 상대잔차제곱합이 임계치보다 낮고, 유의확률은 유의수준 ($p < 0.01$) 보다 높게 나타나 모든 성장형질이 정규분포를 따르고 있음을 확인하였다.

2. 30개월째 가계별 성비율

30개월째 성별 확인 및 외투막 근육조직을 채취하여 Microsatellite DNA 마커를 이용한 친자확인 실험을 실시하였다. 그 결과 100%의 개체 및 가계를 식별하였고 가계별 성비율을 확인하였다. 그 결과, 가계 구분 없이 전체적인 성비율은 암컷이 191마리 수컷이 177마리로 암수 성비율은 1:0.93으로 암수 간에 크게 차이는 나타나지 않으나, 가계별 암수의 성비율을 보면 No. 10 가계의 경우 1:0.3로 암컷비율이 높게 나타나는 경우가 있는 반면 NO. 7 가계와 같이 1:2로 수컷비율이 높은 가계가 확인 되었다 (Table 2).

3. 30개월째 성별에 따른 가계별 성장

30개월째 각 성장형질에 영향을 미치는 성별의 효과를 분석하기 위하여 성을 고정효과로 처리하고 분산분석을 실시한 결과 고도의 유의성이 인정되었다 ($p < 0.01$). Table 2는 가계별로 조사된 각 성장형질에 있어 성별의 효과에 대한 최소제곱

평균과 그 표준오차를 표시하였다. 그 결과 모든 가계에서 모든 성장형질이 암컷이 수컷보다 유의적으로 큰 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), 10가계 전체를 분석하여 보면 각장의 경우 87.04 mm로 수컷의 82.83 mm 보다 4.21 mm 정도 큰 것으로 나타났으며, 각폭은 암컷이 59.17 mm로 수컷의 55.68 mm 보다 3.39 mm 정도 크게 조사되었다. 그리고 중량의 경우 암컷이 79.43 g로 수컷의 66.76 g에 비해 12.67 g 더 무겁게 나타났다. 이와 같이 본 연구에서 조사된 30개월째 북방전복의 모든 성장형질에 있어서 암컷이 수컷보다 유의적으로 크게 나타났다 ($p < 0.05$).

4. 성별에 따른 성장형질의 유전모수 추정

본 연구에서 조사된 30개월째 북방전복의 성별에 의한 성장형질의 유전분산, 환경분산 및 유전력을 추정된 결과, 암컷의 경우 각장, 각폭 및 중량의 유전력이 각각 0.295, 0.320 및 0.296으로 나타났으며, 수컷의 경우 각장, 각폭 및 중량의 유전력이 각각 0.192, 0.185 및 0.152로 나타났다 (Table 3). 또한 각 형질 간 표현형 및 유전 상관계수를 추정된 결과 0.893-0.934 및 0.720-0.897로 정의 상관관계를 보였으며, 특히 암컷이 수컷보다 각 형질 간의 표현형 및 유전적 상관관계가 다소 높게 나타났다 (Table 4).

고 찰

전복류는 성장이 느리고 세대 간의 간격이 길기 때문에 성장형질의 개선이 양식산업에 있어 최대 중요한 요인이다. 따라서 전 세계적으로 전복류의 성장형질의 향상에 대한 연구들이 많이 진행되어 지고 있다 (Vinna, 2002, Lucas *et al.*, 2006; Kubu *et al.*, 2007). Hara (1990, 1992) 는 아시아 지역에서 산업적으로 가장 중요한 북방전복 (*H. discus hannai*) 을 대상으로 종묘생산 현장에서 서로 다른 어미에 의한 종묘생산의 성장을 조사한 결과 어미의 차이에 따른 자손의 성장차이 및 선발에 의한 성장의 향상을 확인함에 따라 전복의 성장형질은 어미의 유전형질과 깊은 관계가 있음을 시사하였다. 또한, Hara and Kikuchi (1992) 는 선발2세대의 18개월째에 2배 이상의 성장향상을 확인하고 선발육종의 유효성을 시사하였다. 이와 같이 전복류의 성장형질 개선을 위해서는 어미의 성장관련 유전형질의 선발이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 북방전복을 대상으로 성별에 따른 성장형질의 변이를 이용한 선발육종의 가능성을 확인하고자, 실제로 암수 1:1 수정을 통하여 10가계를 생산 관리하고 성별에 따른 성장형질의 표현형 측정과 유전모수를 추정하였다.

전복류의 성비율은 *H. cracheroidii* (Weber and Gieses, 1969), *H. rufescens* (Young, 1970), *H. gigantea*, *H. sieboldii*, *H. discus hannai* (Lee, 1974), *H. australis* (Wilson and Schiel, 1995), *H. asinina* (Capinpin *et al.*, 1998) 및 *H. varia* (Najmudeen and Victor, 2004) 에서는 약 1:1로 보고되었고, 본 연구에서도 전체 368 마리의 성비율은 암컷이 191 마리 수컷이 177 마리로 1:0.93 로 나타나 다른 전복류와 차이는 없는 것으로 나타났다. 하지만, No. 10 가계의 경우 1:0.3로 암컷비율이 높게 나타났으며, NO. 7 가계는 1:2로 수컷비율이 2배 높게 나타났다. 이러한 현상은 가계 내의 성별에 따른 성장차이로 4회에 걸친 선발과정에서 나타날 수 있는 오차라 생각 된다.

10가계를 생산 관리하여 30개월째 성별에 따른 성장형질의 차이를 조사한 결과, 각 가계별로 조사된 성장형질의 성별 효과에 대한 최소제곱 평균과 그 표준오차를 보면, 모든 가계에서 모든 성장형질이 암컷이 수컷보다 유의적으로 큰 것으로 나타났으며 ($p < 0.05$), 총 368 마리의 전체를 보더라도 모든 성장형질이 수컷보다 암컷의 성장형질이 유의적으로 큰 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 이러한 결과는 각 가계의 특성이라 보기 보다는 성별에 따른 성장차이로 볼 수 있다. 이러한 표현형 분석자료를 토대로 북방전복의 성별에 따른 성장형질에 대한 유전모수를 분석한 결과, 암컷의 경우 각장, 각폭 및 중량의 유전력이 각각 0.295, 0.320 및 0.296으로 중도의 유전력을 나타낸 반면, 수컷의 경우 각장, 각폭 및 중량의 유전력이 각각

0.192, 0.185 및 0.152로 저도의 유전력을 나타내었다. 그러나 암·수 모두 중도 이하의 유전력을 보여 개체선발 보다는 가계선발이 유리할 것으로 생각된다.

이상의 결과를 정리하면 북방전복 양식현장에서 수차례에 걸친 선발과정을 거쳐 상품크기까지 양성관리 한 후의 성비율 및 성별에 따른 성장형질의 표현형 측정과 유전모수 추정한 결과, 성비율은 1:1로 일반적 전복류의 성비와 같은 결과를 나타내었으며, 성별에 따른 성장은 모든 성장형질에 있어 암컷이 수컷보다 유의적으로 큰 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 이러한 결과는 앞으로 북방전복의 성장향상을 위한 선발육종연구에 있어 성별에 따른 성장형질을 충분히 고려하여야 할 것으로 생각된다.

요 약

북방전복을 대상으로 성별에 따른 성장형질의 변이를 이용한 선발육종의 가능성 여부를 확인하고자, 실제로 암수 1:1 수정을 통하여 10가계를 생산 관리하여 성별에 따른 성장형질의 표현형 측정과 유전모수를 추정하였다. 그 결과 성비율은 1:1로 일반적 전복류의 성비와 같은 결과를 나타내었으며, 성별에 따른 성장은 모든 성장형질에 있어 암컷이 수컷보다 유의적으로 큰 것으로 나타났다 ($p < 0.05$). 이러한 결과는 선발을 할 때 성별에 따른 성장차이를 이용하여 양식전복의 성장을 향상할 수 있는 가능성을 시사하고 있다.

사 사

이 연구는 2016년도 국립수산물과학원 시험연구사업 양식생물 육종품종 개발 및 산업화 과제 (R2016001) 의 지원으로 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- 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.
- Capinpin, E.C. Jr., Encena II, V.C. and Bayona, N.C. (1998) Studies on the reproductive biology of the donkey's ear abalone, *Haliotis asinina* Linné. *Aquaculture*, **166**: 141-150.
- Gjedrem, T. (1983) Genetic variation in quantitative traits and selective breeding in fish and shellfish. *Aquaculture*, **33**: 51-72.
- Gjedrem, T. (1997) Selective breeding to improve aquaculture production. *World Aquaculture*, **28**: 33-45.

- Gjedrem, T. (2000) Generic improvement of cold-water species. *Aquaculture Research*, **31**: 25-33.
- Gjerde, B., Terjesen, B.F., Barr, Y., Lein, I. and 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.
- Hara, M. (1990) The effect of genetics of growth in three groups of abalone seeds. *Bull. Tohoku. Reg. Fish. Res. Lab.*, **52**: 73-78.
- Hara, M. (1992) Breeding of abalone-cross and selection. *Fish Genetics Breeding Science*, **18**: 1-12. (in Japanese).
- Hara, M. and Kikuchi, S. (1992) Increasing growth rate of abalone, *Haliotis discus hannai*, using selection techniques. *NOAA Technical report*, **106**: 21-26.
- Kim, J.H., Kim, H.C., Noh, J.K., Lee, J.H., Kang, J.H. and Kim, K.K. (2007) Growth and Sex Ratio of Juvenile Olive Flounder (*Paralichthys olivaceus*) at different size-ranks. *Journal of Fisheries Science and Technology*, **10**(4): 191-195.
- KMI (2015) Korea Maritime Institute. Fisheries Outlook Center Statistical DB. Busan, Korea.
- Kubu, P.D., Appleyard, S.A., Elliott, N.G. (2007) Selective breeding greenlip abalone (*Haliotis laevis*): Preliminary result and issue. *Journal of Shellfish Research*, **26**: 821-824.
- Lee, T.Y. (1974) Gametogenesis and reproductive cycle of abalones. *Publications of the Marine Laboratory, Busan Fisheries College*, **7**: 21-50.
- Lucas, T., Macbeth, M., Degnan, S.M., Knibb, W., Degnan, B.M. (2006) Heritability estimates for growth and tropical abalone *Haliotis asinina* using microsatellite to assign parentage. *Aquaculture*, **259**: 146-152.
- Misztal, I. (1990) Restricted maximum likelihood estimation of variance components in animal model using sparse matrix inversion and a supercomputer. *Journal of Dairy Science*, **73**: 163-172.
- Najmudeen, T.M. and Victor, A.C.C. (2004) Reproductive biology of the tropical abalone *Haliotis varia* from Gulf of Mannar. *Journal of Marine Biological Association of India*, **46**: 154-161.
- Palada-de Vera, M.S. and Eknath, A.E. (1993) Predictability of individual growth rates in tilapia. *Aquaculture*, **111**: 147-158.
- 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.
- 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.
- Vinna, M.T. (2002) Abalone Aquaculture, An overview. *World Aquaculture* pp. 34-39.
- Weber, H.H. and Gieses, A.C. (1969) Reproductive cycle and gametogenesis in the black abalone, *Haliotis cracheroidii* (Gastropoda: Prosobranchiata). *Marine Biology*, **4**: 152-159.
- Wilson, N.H.F. and Schiel, D.B. (1995) Reproduction in two species of abalone (*Haliotis iris* and *H. australis*) in southern New Zealand. *Marine and Freshwater Research*, **46**: 629-637.
- Young, J.S. (1970) The reproductive cycle, gonadal histology and gametogenesis of the red abalone *Haliotis rufescens* (Swainson). *California Fish and Game*, **56**: 298-309.