

양식산 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 가성 백색증 (pseudo-albinism) 발현에 미치는 환경인자들의 영향

강덕영* · 김호찬¹ · 김종현² · 김경길² · 명정인³
국립수산과학원 서해수산연구소, ¹부경대학교, ²국립수산과학원 육종연구센터
³국립수산과학원 양식환경연구센터

Effects of Environment Factors on the Occurrence of Pseudo-albinism in Cultured Flounder, *Paralichthys olivaceus*

Duk-Young KANG*, Hyo-Chan KIM¹, Jong-Hyun KIM², Kyung-Gil KIM²
and Jeong-In MYEONG³

West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Incheon 400-420, Korea

¹Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²Genetic and Breeding Research Center, NFRDI, Geoje 656-842, Korea

³Aquaculture Environment Research center, NFRDI, Tongyeong 650-943, Korea

We examined the cause of albinism in a hatchery population of flounder in terms of environmental and nutritional factors, including the effects of light intensity (130-12,300 lux), photoperiod (12L/12D or 24L/0D), tank substrate (concrete or fiber-reinforced polymer), tank color (white or dark green) and supplement with enriched live food, and also compared the growth of normal and albino fry under both 12L/12D and 24L/0D. Further to, normalization of the skin pigmentation pattern on the ocular side has been investigated after rearing the albino fry for 2 years after their identification and classification and found that, light intensity did not play a critical role in the development of normal pigmentation or albinism in the flounder. By contrast, the photoperiod was a weak inducer of albinism in the flounder. Tank substrate and color also affected the hypomelanosis on the ocular side of the flounder fry. The choice and supplementation of enriched live foods could drastically reduce the incidence of albinos in hatcheries. On comparing the growth of normal and albino fry, while there was no difference between the groups under 24L/0D, the growth of the albino flounder was slower under 12L/12D. Although coloration resulting from xanthophore and melanophore, but not iridophores, occurred on the ocular side, evidence of albinism remained on the ocular side of flounders.

Key words: Albinism, Olive flounder, *Paralichthys olivaceus*, Environment factors

서 론

이체형 어류 (heterosomata)는 전 세계적으로 수산업에 있어 중요한 종으로 여겨져 왔다. 여기에는 대표적으로 넙치 *Paralichthys olivaceus*, turbot *Scophthalmus maximus*과 halibut *Hippoglossus hippoglossus* 등이 있으며, 이들 어류는 양식 산업과 자원 조성용으로 종묘의 대량생산이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 대규모의 종묘생산은 자연계에서 관측되지 않는 높은 비율의 기형어를 만들어 내고 있으며, 그 중 가장 문제가 되는 기형이 표피의 체색 이상발현이다. 여기에는 두 가지 증체가 있으며, 눈이 있는 쪽에 정상적인 착색이 이루어지지 않는 유안측 가성 백색증 (pseudo-albinism, hypomelanosis: 이하 백색증)과 정상개체와 달리 눈이 없는 아래쪽에 체색 침착이 이루어지는 무안측 흑색증 (hypermelanosis)이 여기에 속한다. 현재 이들 체색이상 현상의 발현 원인에 대해서는 여러 가지 요인이 제시되고 있지만, 아직까지 그 원인을 정확

하게 구명하지는 못하고 있다. 단지 병인학적 관점이 아닌, 유전 (Shikano, 2005), 먹이 (Næss and Lie, 1998)와 영양원 (Hamre et al., 2005) 및 사육환경 (Denson and Smith, 1997) 등의 요인이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 추정될 뿐이다.

현재 우리나라는 물론 일본에서는 종묘생산 기술이 현저하게 발달하여, 1980년 이후 연안 수역에서 수백만 마리의 양식 및 방류용 넙치 치어가 생산되고 있다. 넙치는 생물학적으로 유영성 어류와 달리 수온 20°C에서 약 30일 이후 눈의 측편화, 표피 색소포 침착 및 체형 변화 등과 같은 변태를 통해 저서생활을 한다. 하지만 이 종의 종묘생산 기술이 광범위하게 보급되면서 인공종묘 생산에 따른 체색이상 현상이 높은 비율로 나타나고 있다. 특히 백색증은 넙치에 있어 다른 질병의 유발 요인으로 작용하지는 않지만, 자연 생태계에서 포식자에게 쉽게 노출되기 쉽기 때문에 자원조성용 종묘로 활용가치가 떨어지며, 또한 양식 현장에서 상품성이 낮은 관계로 종묘생산 후 전량 폐기되어 많은 경제적 손실을 유발한다.

*Corresponding author: dykang@hotmail.com

이에 일부 연구자들은 양식산 넙치의 백색증을 서식 공간 내 저질과 저면색(Iwata and Kikuchi, 1998), 군집밀도(Takahashi, 1994), 수온 및 유속(Sugiyama et al., 1985), 포기(Fukusho et al., 1986), 빛의 조건(Seikai, 1991) 및 UV조사(Matsumoto and Ishii, 1986) 등과 같은 사육환경과 연관 지어 이 문제를 해결하려고 하였다. 그 중에서 최상의 결과는 자어 기 동안에 이용되는 먹이생물에 대한 수용성 비타민과 지질에 의한 영양 강화(Estevéz, 1996) 및 사료 내 영양원 조절(Seikai, 1985a; Seikai et al., 1987a,b; Yamamoto et al., 1992)에 의한 연구에서 확인되었다. 그러나 백색증의 발현 비율이 개체마다 차이가 존재하고, 사육환경에 따라 다르게 나타나고 있다는 점에서 백색증 발현 요인을 영양원만으로 귀결시키는 데는 무리가 있다. 이것은 영양원이 주된 요인이라고 하더라도, 그 외 사육 환경 등이 부가적으로 백색증 발생 비율에 작용을 할 수 있음을 의미한다. 최근에 와서는 유전력이 강하다는 사실이 Shikano (2005)에 의해 보고되면서, 넙치의 백색증 원인에 대한 유전학적 검토가 제고되어야 할 것이다.

본 연구에서는 “영양요인, 조도, 일광시간, 사육수조 재질 및 색상 등의 사육환경 등이 백색증의 주요 인자일 것이다”란 가설 아래, 이들 요인이 백색증 발생에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 일반적으로 산업현장에서 알려져 있는 “백색증 개체의 성장은 정상 개체보다 빠르다” 및 “백색증 개체는 양성 시 정상으로 완전히 회복 된다” 등의 속설이 사실인지를 규명하였다.

재료 및 방법

실험어 종묘 생산

실험어 종묘 생산 시 사육수의 관리는 부화 8일 후까지는 매일 10% 가량의 여과해수 (34.2 ± 0.6 psu)를 일정하게 보충하면서, 사육수에 해산 클로렐라 밀도가 약 5×10^5 세포/1 mL되도록 유지하였다. 9일 후부터는 지수식으로 사육하면서 사육수의 20-30%를 매일 1회 환수하였으며, 30일 후부터는 유수식으로 전환하였다. 먹이는 로티퍼, *Brachionus plicatilis* 밀도가 부화 후 10일까지는 4-5개체/mL, 11-20일에는 6-8개체/mL, 그리고 21-30일에는 4-5개체/mL 되도록 관리하였으며, 배합 사료는 개구 후 8일째부터 19일째까지는 넙치 초기배합사료 A형 (250 μ m)을 주었고, 20일부터는 B형 (400 μ m)을 주었으며, 이후 성장함에 따라 크기와 양을 늘렸다. 또한 상품용 알테미아, *Artemia nauplii* 유생은 개구 12일째부터 40일째까지 사육수 1 mL 당 0.5-1.0 개체가 되도록 공급하였다. 수온은 16.5-18.5°C (평균 17.8°C)로 유지시켰다.

실험항목 및 실험구

사육조건별 백색증 출현율

조도의 영향

본 실험은 부화 직후 자어를 이용해 1톤 암갈색 FRP수조에서 수조당 1,000마리씩 수용하여 실시하였다. 실험 기간은

부화 직후부터 50일간이었으며, 사육 조건은 조도를 제외하고는 앞서 설명한 통상적인 종묘생산 사육조건과 동일하게 했으며, 공급된 먹이생물은 별도의 영양 강화는 하지 않았다. 실험에 이용된 조도 조건은 130-13,000 lux 범위에서 14개의 조도별 실험구, 즉 일간 최대 조도를 12,300, 10,950, 10,200, 2,320, 1,884, 1,700, 1,200, 1,021, 935, 930, 914, 890, 870, 130 lux로 2반복으로 설정하여 실험 종료 시 실험구별 백색증 출현율을 조사하였다.

명암 주기에 따른 영향

본 실험은 부화 직후 치어를 이용해 1톤 흰색 FRP수조에서 수조당 1,000마리씩 수용하여 부화 직후부터 50일간 실시하였다. 실험 기간 중 조도는 1,200 lux 정도를 유지하여 주었으며, 사육조건은 앞서 제시한 통상적인 종묘생산 사육조건과 동일하게 했으나, 공급된 먹이생물만 영양 강화를 하지 않았다. 이때 명주기 제공 시간에 따른 영향을 파악하기 위해 24시간 명주기구 (24L/0D)와 12시간 명주기구 (12L/12D)와 같이 2개의 실험구를 3반복으로 설정하였으며, 실험 종료시 실험구별 백색증 출현율을 조사하였다.

수조 재질 및 색상에 따른 영향

본 실험은 부화 직후 치어를 이용해 수조당 1,000마리씩 수용하여 50일간 실시하였다. 넙치 백색증 출현에 있어 수조의 재질 및 색상별 영향을 파악하기 위해 1톤의 콘크리트 수조 및 1톤의 FRP 수조 (흰색, 암갈색)에서 2반복으로 실시하였다. 이때 조도는 약 1,200 lux이었으며, 앞서 설명한 통상적인 종묘생산 사육조건과 동일하게 해 주었다. 이 때 제공된 먹이 생물은 영양 강화를 하지 않았다.

먹이생물 영양 강화 효과

본 실험은 부화 직후 치어를 이용해 1톤 암갈색 FRP수조에서 수조당 1,000마리씩 수용하여 실시하였다. 실험 기간은 부화 직후부터 70일간 실시하였으며, 실험 기간 중 조도는 1,200 lux 정도를 유지하여 사육조건은 통상적인 종묘생산 사육조건과 동일하게 해 주었다. 이 때 먹이생물인 로티퍼와 알테미아에 영양 강화를 실시한 것과 실시하지 않았을 경우 넙치 종묘의 백색증 출현율 차이를 알아보기 위해 2개의 실험구를 설정하였다. 대조구의 클로렐라와 유지효모로만 배양한 로티퍼와 시판용 알테미아를 부화 직후 넙치 자어에게 공급하였다. 영양 강화구는 자어의 먹이로 사용된 로티퍼는 해산클로렐라, 유지 효모 및 시판용 영양강화제 (HUFA-DHA-EPA 혼합 영양강화제)를 혼용하여 배양한 것을, 알테미아는 배양기에서 부화한 개체를 수집하여 여과해수로 세척한 다음, 개구 후 약 4-6시간 동안 영양 강화 후 수거하여, 담수로 1회 세척한 뒤 사육 자어에 공급하였다.

백색증 넙치의 생물학적 특성

정상과 백색증 개체의 성장 차 비교

본 연구는 명암주기의 영향 실험에 사용된 넙치 치어들을 대상으로 실험 종료 시 실험구 별 성장도를 상호 비교해, 동일

사육 조건에서 백색증과 정상 개체간의 성장 차가 존재하는 지에 대해 알아보았다.

백색증 개체의 장기 육성시 체색변화

본 연구를 위해 평균 6 cm 넙치 종묘 중 백색증이 나타난 개체들만 별도로 선별하여, 육상 수조에서 약 2년간 양성하였다. 이때 어미로 성장함에 따라 표피의 체색이 어떻게 변하였는지를 외부 형태학적으로 조사하였다.

통계처리

자료의 분석은 SPSS-PC 통계패키지를 이용하여, ANOVA 및 t-test를 실시하였고, 유의차 검정은 Duncan's multiple range test를 통해 파악하였다.

결 과

사육조건별 백색증 출현율

조도의 영향

1톤 암갈색 FRP수조를 이용해, 130-13,000 lux 범위에서 14개 조도별 실험구를 설정하여 50일간 사육한 결과, 넙치 치어의 백색증 발생률은 18.0-88.8% 범위로 다양하게 나타났으며, 조도 2,000 lux 이하에서 백색증 발생률은 조도와 아무런 상관이 없는 것으로 나타났다. 그러나 10,000 lux 이상의 경우 조도와 백색증 발생률은 다소 정 상관관계의 가능성이 있는 것으로 나타났으나, 표본의 수가 적어 통계적인 유의성은 검증하지 못했다 (Fig. 1).

명암 주기에 따른 영향

넙치의 초기사육 환경 중 명암 주기에 따른 넙치의 백색증 발생률에 영향을 미치는 영향을 파악하기 위해 50일간 사육 후 명주기 24시간구와 12시간구를 비교 분석해 보았다. 그 결과, 24시간구의 경우 백색증 발생률이 47.0±1.0%였으며, 12시간구의 경우 39.8±4.1%로서 명주기가 12시간만 제공된 실험구에서 백색증 발생률이 유의하게 낮은 것으로 나타났다 (Fig. 2).

수조 재질과 색상의 영향

사육 수조의 재질에 따른 영향을 파악해 본 결과, 50일간의 사육 후, 넙치 치어의 백색증 발생률은 콘크리트 수조의 경우 34.5±0.9%였으며, 흰색수조의 경우 42.7±1.9%, 암갈색 수조의 경우 53.1±3.2%였다. 따라서 콘크리트 수조는 FRP 수조에 비해 낮은 백색증 발생률을 나타내었으며, FRP 수조 색상에 의한 영향도 다소 있는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 3).

먹이생물 영양 강화 효과

먹이생물인 로티퍼와 알테미아에 영양 강화를 실시했을 때와 실시하지 않았을 경우 넙치 백색증 출현율을 알아보기 위해, 부화 직후부터 70일간 사육실험을 실시하였다. 그 결과, 먹이생물을 영양 강화한 enriched group은 백색증 발생률이 20.5±2.1%였으나, 영양 강화를 하지 않고 먹이생물을 공급한 non-enriched group은 57.3±5.20%로, 먹이생물을 영양 강화를

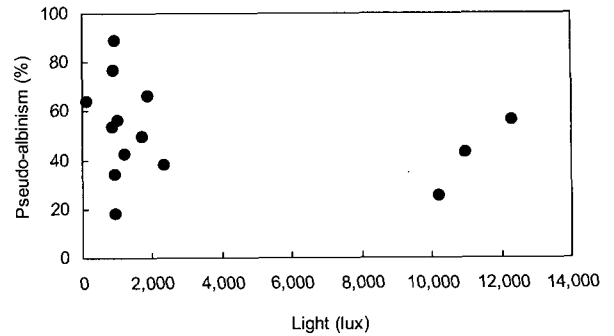


Fig. 1. Frequency of pseudo-albinism of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* reared with the various intensities of illumination for 50 days.

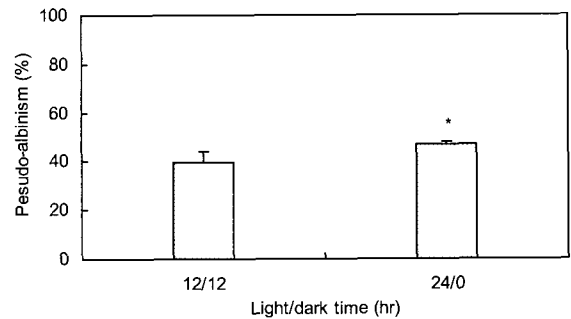


Fig. 2. Frequency of pseudo-albinism of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* reared with the various light/dark cycles for 50 days.

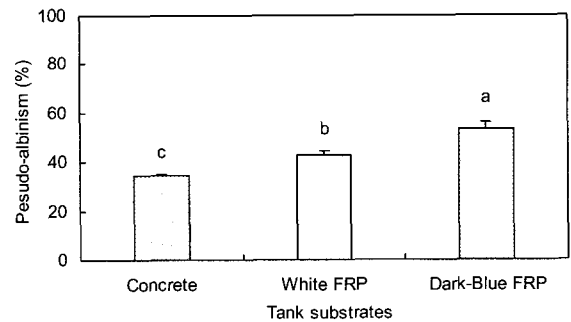


Fig. 3. Frequency of pseudo-albinism of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* reared with tank substrate and colors for 50 days.

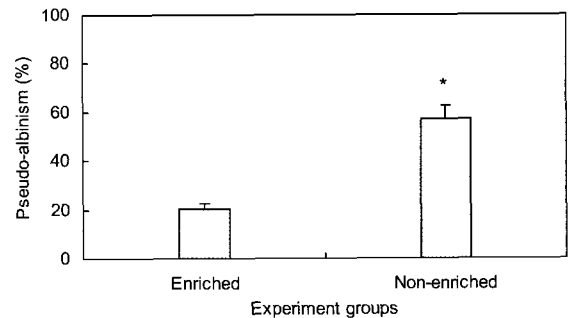


Fig. 4. Frequency of pseudo-albinism of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* fed enriched and non-enriched living food organisms with HUFA, DHA and EPA for 70 days.

하지 않고 넙치 자어에게 공급한 실험구에서 유의하게 높은 발생률을 나타내었다 (Fig. 4).

백색증 넙치의 생물학적 특성

정상과 백색증 개체의 성장 차 비교

명암주기의 영향 실험에 사용된 넙치 치어들을 대상으로 실험 종료 시 성장도를 비교해본 결과, 정상개체와 백색증 개체 모두 명주기 12시간구에서 24 L시간구보다 성장이 빠른 것으로 나타났다. 동일한 명주기에서 정상과 백색증 개체의 성장차 비교에서는 명주기 12시간구에서는 정상 개체가 백색증 개체보다 빠른 성장을 나타낸 반면, 명주기 24시간구에서는 정상개체와 백색증 개체 사이에 성장차는 나타나지 않았다 (Fig. 5).

백색증 개체의 체색 특성

종묘생산 시기에 평균 6 cm 넙치 종묘 중 백색증으로 판명된 개체들만 선별하여, 육상 수조에서 약 2년간 양성한 결과, 이들의 유안측의 체색은 Fig. 6과 같다. 정상의 개체는 황색소포, 흑색소포, 광채소포 등이 고르게 발달되어 있는 것에 반해, 백색증 개체들은 어릴적 체색 침착이 되지 않은 부분에 황색소포에 의한 체색 침착이 이루어져 무색포의 흔적은 사라졌다. 그러나 유안구측의 체색소포 중 흑색소포와 광채소포 등의 침착은 미약하여, 체표의 무늬와 체색이 알록달록한 형태를 이루고 있었으며, 특히 옆줄 선을 중심으로 색소포 침착이 미약하여, 옆줄선이 하얀 선으로 나타나기도 하여, 어릴 적 백색증 흔적은 2년 정도 지난 성어가 되어서도 잔존하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 6).

고 찰

넙치와 가자미류 등과 같은 경제성이 높은 이체형 어류에 대한 소비 계층의 수요 증가와 연안의 자원량의 급격한 감소로 인해 현재 전 세계적으로 이러한 이체형 어류의 양식 산업화에 많은 관심이 모아져있다. 이체형 어류의 양식 산업화를 위해서는 대상 종의 종묘생산 및 양성 사육에 필요한 기반 기술의 개발은 물론 생활사 동안 사육 개체들의 건강 유지와 최적 성장 유도를 위한 생물학적 기초 자료의 확보가 필수적인 것으로 생각된다. 특히 종묘생산 단계에서 요구되는 먹이, 환경, 영양학적 조절 기술들은 매우 중요하다. 이러한 조건들의 적절한 관리가 부족할 경우 성장저하, 생존율 감소, 기형어 출현 등의 문제로 경영상 채산성에 큰 영향을 미칠 수 있어, 종묘생산업과 양식산업의 발전에 걸림돌로 작용할 수 있다.

넙치의 종묘생산 단계에서 나타나는 문제점 중 하나는 착저기 이후 나타나는 체색이상 발현이다 (Matsumoto and Seikai, 1992). 특히 유안측에 색소가 결핍되어 나타나는 백색증은 양식산 인공종묘로서 상품 가치를 저하시키고 (Seikai and Matsumoto, 1991), 보호색 (cryptic colouration) 부족으로 인해 연안 수산자원조성용으로 방류될 경우 포식자에게 노출되기

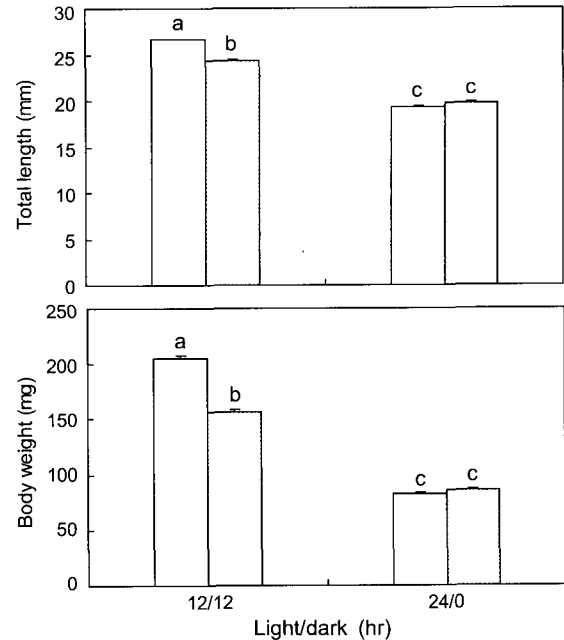


Fig. 5. Total length and body weight of normal and pseudo-albino fry flounder, *Paralichthys olivaceus* reared in the two L/D cycle condition for 50 days after hatching. □, Normal; ■, Pseudo-albinism.

쉬워서 생존율을 낮추는 요인으로도 작용한다 (Seikai and Matsumoto, 1991; Howell, 1994; Furuta, 1998; Furuta et al., 1998). 또한 백색증의 유전력이 존재할 경우에는 백색증 개체들의 자연계 방류는 연안자원의 유전적 오염을 유발할 수 있으며, 자연계의 유전적 우량성을 해칠 우려도 있다. 이체형 어류의 표피구조는 일반적으로 유사한데 (Suzuki, 1994), 이것은 4-12세포 정도의 두께로 고분화된 막으로서, 보호성 및 삼투성 방어벽으로 되어있다 (Roberts et al., 1971). Seikai (1992)에 따르면 넙치의 표피구조는 상피세포 (epidermal cell), 염세포 (chloride cell) 및 점액세포 (mucus cell)로 이루어지고, 그 밑에 진피 (dermis), 피하교원층 (subepidermal collagenous), 섬유아세포 (fibroblast), 멜라닌 보유세포 (melanophore), 광채세포 (iridophore) 및 황색세포 (xanthophore)로 구성되어 있다. 이체형 어류의 체형은 변태개시 전까지는 양면대칭형이며 (Seikai and Matsumoto, 1991; Seikai, 1992), 색소아세포 (chromatoblast)는 양면에 걸쳐 전반적으로 고르게 분포한다. 그러나 변태가 이루어지기 시작하면서, 정상적으로 발달한 자어의 유안측면의 멜라닌세포는 무안측면보다 더 많이 번져나가고, 피부 표피 쪽으로 옮겨간다 (Seikai, 1992). 이체형 어류는 변태 중기에 이르러서는 분화중인 색소포가 유안측면에서만 검출되며, 이 시기에 무안측면에서는 색소아세포의 세포 용해 (cytolysis)가 일어난다 (Seikai and Matsumoto, 1994). 따라서 정상적인 이체형 어류의 자어는 변태의 진행에 따라 유안측면의 표피에만 다수의 멜라닌 보유세포를 지니고 있게 되지만, 백색증 개체는 유안측면 표피에 멜라닌세포의 부족현

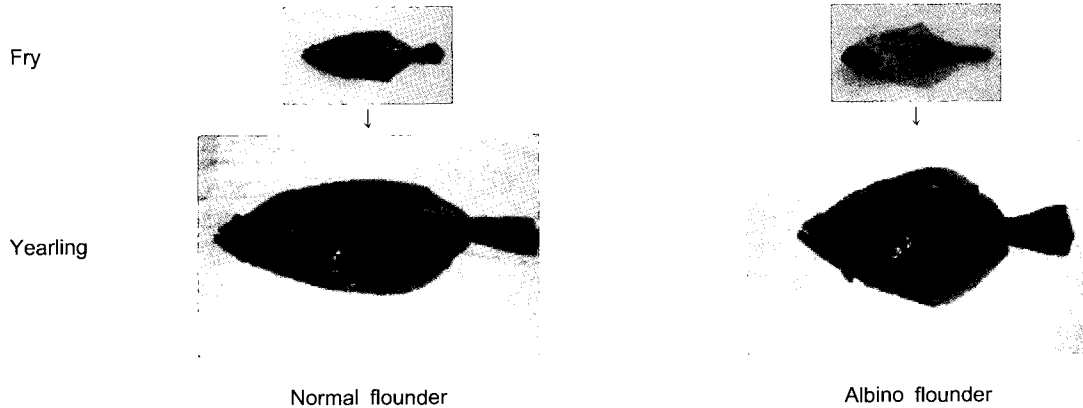


Fig. 6. Photographs of normal and pseudo-albinic olive flounders *Paralichthys olivaceus* showing the changes of the color patterns of ocular sides of the fish reared for two years. Fry: TL 6.0 ± 0.2 cm; 2-year old yearling: TL 50.0 ± 2.6 cm.

상이 일어나며, 세포 용해를 나타내는 세포가 양면에서 관찰된다 (Roberts et al., 1971; Seikai and Matsumoto, 1991, 1994). 이러한 백색증 현상에 관한 초기 연구는 이체형 어류의 상층 표피의 단위표면적당 멜라닌세포 보유수의 비교를 통해 이루어졌다. Suzuki (1994)는 가성 백색증 넙치에서 멜라닌 생성세포 (melanocyte) 또는 멜라닌 생성아세포 (melanoblast) 쪽으로 이동하여 식작용 (phagocytosis)을 하는 다수의 멜라닌 탐식조직구 (melanophage)가 비착색 영역에서 존재하며, 착색 영역에는 존재하지 않는다는 것을 확인하였다.

그렇다면 이러한 가성 백색증이 나타나는 이유는 무엇인가? 여기에는 연구자들에 의한 의견이 분분하다. 생태학자들의 경우 사육환경이 이체형 어류의 백색증의 주요 원인이라고 주장한 반면, 영양학자들의 경우 인지질, DHA, EPA, Vitamin A & D 등 필수 미량원소인 영양원이 주요인이라고 보고한 바 있다. 또한 유전생화학들의 경우 유전적 결함에 따른 생화학적 이상으로 인한 것으로 보고 있다 (Bolker and Hill, 2000). 우선 사육환경에 따른 인자 중 조도의 영향을 살펴보면, 이체형 어류의 정상적인 색소 발달에 빛의 강도가 중요한 역할을 할 수도 있는 것으로 학자들은 보고 있다. Gartner (1986)는 천해에 서식하는 이체형 어류에서 비정상적 색소발달이 빈번히 일어나는 것에 착안해 저흑색증을 포함한 색소이상 발달 빈도는 이체형 어류의 출현 수심별 조도의 영향으로 보았다. 또한 Matsumoto and Ishii (1986)와 Seikai et al. (1987c)는 이체형 어류의 유·무안측면의 멜라닌 형성이 UVB 조사에 의해 자극받을 수 있음을 추정하고 있다. 실제 부적절한 빛의 조사는 종묘생산 시 군집 내 색소이상 발현에 관여할 수도 있다. Southern flounder (*P. lethostigma*)을 이용한 Denson and Smith (1997)의 연구에 따르면, 낮은 조도에서 발현된 가성 백색증은 부화 후 37일에 조도를 증가시켰을 때 색소 침착이 증가하여, 정상적인 체색으로 발달하는 것을 확인시켜 주었다. 또한 Benetti (1997)는 자연 수집된 pacific flounder (*P. woolmani*) 치어 1,200마리를 통한 연구에서, 수집 당시는 백색증이 단

한 마리도 관찰되지 않았지만, 1마리/L 밀도, 높이가 낮은 1,000 L 수조에서 일정한 광 조건으로 사육을 했을 때 실험개시 24시간 이내에, 약 15%가 약한 가성 백색증의 증세를 나타내는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 만성적 백색증 현상이라 보다는 스트레스에 의한 일시적 체색변화에 의한 것으로 추정된다. 또한 Kanazawa (1993)은 실험을 통해 백색증의 넙치는 빛에 대한 감도가 약한 것을 확인할 수 있었다. 즉 동일 수조 내에 한 면은 어둡게 하고, 다른 한 면은 밝게 하여, 정상과 백색증 넙치를 사육한 결과, 정상 착색개체들은 낮 동안 수조의 어두운 구역 모여 있고, 밤 동안에는 수조의 밝은 구역으로 이동하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이에 Kanazawa (1993)는 이것이 백색증 어류의 약한 시각적 인식력에 의한 것으로 해석하고 있다. 본 연구의 경우, 사육환경 인자인 조도, 명암주기에 따른 넙치 치어의 백색증발생 비율을 비교·분석해 보았다. 우선 조도의 경우 2,000 lx 이하에서는 조도와 백색증 발병률은 아무런 상관도 없는 것으로 나타났으나, 비록 표본의 수가 적어 불분명하지만 10,000 lx 이상의 경우 조도와 백색증 발생률은 상관관계가 있을 가능성이 나타나 차후 여기에 대한 새로운 조사가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 한편 명암 주기의 경우 50일간 사육 후 명주기 24시간구와 12시간구를 비교 분석해 본 결과, 통계적으로 유의하게 24시간구의 백색증 발생률이 12시간구보다 높았다.

한편 이체형 어류는 포식자로부터 자신을 보호하기 위해 주변 서식환경에 맞춰 체색 및 형상을 변화시키는 능력을 지녔다 (Ramachandran et al., 1996; Ellis et al., 1997). 이러한 이체형 어류의 체색 변화는 두 가지 형태로 나누어 볼 수 있는데, 포식자 또는 외부의 스트레스 인자에 의해 급격하게 변화되는 흥분성 또는 은폐성 변화 (cryptic change)와 비록 느리지만 발달과정 중에 착색이 일어나는 완만한 만성적 변화와 같이 크게 두가지 형태로 나눌 수 있다 (Fujii and Oshima, 1986). 전자는 색소포 내에서 색소의 유동성으로부터 야기되는 생리학적 체색 변화이지만, 후자는 실제 세포내 색소 물질

량의 변화에 의한 형태학적인 변화이다. 비록 이체형 어류에서 급격한 체색 변화와 위장 습성 (camouflage behavior)이 존재한다는 것 (Ramachandran et al., 1996; Ellis et al., 1997)과 환경 인자 중 서식 공간 내 저질과 저면색이 감각신호를 통해 멜라닌 생산을 촉발시켜 이체형 어류의 체색 발달에 영향을 미친다는 사실이 일부 알려져 있으나 (Benetti, 1997; Ellis et al., 1997; Iwata and Kikuchi, 1998), 장기간의 형태학적 발달과정에 있어 환경 인자들이 미치는 효과에 대한 이해는 거의 진전이 없다. 본 연구의 경우 수조 재질에 따른 비교에서는 50일간의 육성 후 백색증 발생률은 콘크리트 수조가 가장 낮았으며, 다음으로 흰색수조였으며, 암갈색 수조의 경우 가장 높은 값을 나타내어, 콘크리트 수조와 FRP 수조 사이에 백색증 발생률 차이가 존재할 뿐 아니라, FRP 수조 간에서도 색상별로 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험 기간동안 백색증의 치어를 선별하여, 이들의 체색이 만성적으로 어떠한 변화 과정을 겪는지를 확인해 보기 위해, 2년간 이들 백색증 개체를 콘크리트 수조에서 사육하였다. 비록 백색증 개체들은 성어로 자라나면서, 유안측면에 황색소포의 침착으로 백색증은 사라졌으나, 흑색소포와 광채소포의 발현 빈도가 낮아 유안측면에 옆줄 선이 뚜렷이 관측되었으며, 표면체색이 일정하지 않은 얼룩덜룩한 무늬를 지닌 듯 보였다.

이체형 어류의 자어는 부화 후 며칠 뒤부터 먹이를 섭식한다 (Daniels et al., 1996; Benetti, 1997). 자연계 내 서식하는 이체형 어류의 자어는 동물플랑크톤을 중요한 영양 요소로 활용하지만, 일반적으로 종묘생산 시 자어는 일반적으로 로티퍼를 섭식하며, 연이어 변태시까지 알테미아를 섭식한다 (Seikai, 1985a,b). 다양한 종류의 동물플랑크톤을 섭식한 자연계 개체들과 달리 인공사육 개체들의 경우 한정된 종류의 먹이생물을 섭식함에 따라 영양 또한 한정될 수밖에 없다. 따라서 일부 연구자들은 자치어 사육단계에서 공급되는 제한된 종류의 먹이생물과 영양원이 이체형 어류의 백색증을 유발하는 것으로 보는 시각도 많다 (Takeuchi et al., 1995; Næss and Lie, 1998). Seikai (1985a,b)는 자어의 먹이로서 자연산 동물플랑크톤을 이용해 대부분 정상 착색 넙치 자어를 생산할 수 있지만, 시판용 알테미아와 로티퍼를 자어에 먹였을 경우엔 높은 비율로 백색증이 발생한다고 보고하였다. 이러한 먹이원인 동물플랑크톤의 차이가 넙치의 백색증을 유도할 수 있음을 알게 되었지만, 그러면 왜 그러한 현상이 나타나는지에 대한 의문을 지니게 되었다. 따라서 연구자들은 먹이생물인 동물플랑크톤의 영양학적 조성이 이체형 어류의 체색발현에 영향을 지니고 있는 것으로 보고, 지방산, DHA/EPA 비율, 그리고 비타민 A와 D에 초점을 맞춰 실험을 진행하였다 (Hamre et al., 2005). 이에 Kanazawa (1991)는 marbled sole (*Limanda yokohamae*)에 있어 멜라닌 형성은 사료에 DHA가 결핍되었을 때 손상을 입는다는 것을 발견했다. Dhert et al. (1994)는 turbot 치어에 고농도의 DHA와 함께 사료를 공급했을 때 최상의 착색수준을 얻을 수 있다고 보고하였다.

Devresse et al. (1994)는 색소형성이 단지 DHA 함량에만 관련된 것이 아니라, 오히려 다른 지방산인 eicosapentaenoic acid에 대한 DHA의 비율에 관련된 것이라고 주장한다. Kanazawa (1993)는 이체형 어류의 백색증은 DHA에 의존적인 산물인 로돕신 (rhodopsin) 결핍의 결과로 결론을 맺었다. 또한 Nakamura et al. (1986)는 불충분한 멜라닌 생산을 리보플라빈, 카로티노이드 및 비타민 A와 D와 같은 감광성 물질 (photosensitive substance)의 결핍에 의한 것으로 추정하였다. 본 연구의 경우, 시판용 영양강화제 (HUFA-DHA-EPA 혼합 영양강화제)를 이용해 부화 직후부터 90일간 먹이생물인 로티퍼와 알테미아에 영양 강화를 실시했을 때와 실시하지 않았을 경우 넙치 백색증 출현율을 알아보았다. 그 결과, 먹이생물을 영양강화한 실험구에서의 백색증 발생률은 $20.5 \pm 2.1\%$ 였으나, 영양강화를 하지 않고 먹이생물을 공급한 실험구에서는 $57.3 \pm 5.20\%$ 로 유의하게 높은 백색증 발생률을 나타내었다. 이와 같이 먹이생물의 영양강화 여부가 다른 어떤 외부 인자보다도 강하게 넙치의 백색증에 관련되어 있었다.

한편 양식 현장에서 백색증 넙치가 정상 착색 넙치보다 성장이 빠르다는 속설이 있는데, 그것은 체색 착색에 사용되어야 할 에너지가 체성장으로 옮겨가서 나타난 것으로 추정되어 왔다. 이에 본 연구에서는 명암주기에 따른 백색증 출현률 실험에서 나온 개체들을 대상으로 동일한 명주기에서 정상과 백색증 개체의 성장차를 비교해 보았다. 그 결과 명암주기에 따라 정상 개체와 백색증 개체간의 크기 차이가 존재하며, 백색증 개체들이 정상 개체보다 작거나 동일한 것을 확인하였고, 정상보다 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 주야를 균등하게 제공한 12L/12D 구의 경우 백색증 개체의 크기가 정상보다 오히려 작았으며, 이러한 연구결과는 turbot, *Colistium nudipinnis*을 이용한 실험 (Diggle, 2000)에서도 확인할 수 있다. Diggle (2000)에 의하면 오히려 백색증 개체들은 성장이 정상 개체보다 느릴 뿐 아니라, 질병 내성도 약하다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 24시간 지속적으로 명주기를 제공한 실험구에서는 12L/12D와 달리 정상개체와 백색증 개체간에 성장차는 인정되지 않았다. 이러한 것은 yellowtail flounder, *Limanda ferruginea*의 성장 비교 실험 (Purchase et al., 2002)과 turbot, *Scophthalmus maximus*과 halibut, *Hippoglossus hippoglossus*을 이용한 실험 (Imslund, 2006)에서도 정상과 백색증 개체 사이에서 성장차는 없는 것으로 나타났다. 따라서 어떠한 경우에도 이체형 어류의 백색증 개체는 정상 개체보다 성장면에서 빠르다는 속설은 사실이 아닌 것으로 확인되었다.

또한 일부 양식어가에서는 어린 시절 백색증 개체들은 성장을 하면서 백색증의 흔적이 모두 사라져 정상적인 개체와 구분할 수 없게 되므로, 백색증 개체들을 폐기하지 말고 양성용으로 사용해도 된다고 주장하고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 궁금증을 해결하기 위해 2년간 백색증 넙치 치어를

양성해 보았다. 그 결과, 본 연구에는 제시하지 않았지만, 백색증이 약하게 나타났던 치어 중 일부 (약 20%)는 정상 개체와 구분이 안될 만큼 1년 이내에 회복이 된 것으로 확인되었다. 그러나 대부분은 유안측면에 황색소포의 침착은 이루어지나, 흑색소포의 침착이 약하게 진행되면서, 여전히 유안측 표피에 흔적이 잔존하는 것으로 확인되어, 시장에서 상품 가치를 인정받기 어려웠다.

한편 최근에 와서 Shikano (2005)에 의하면 종묘생산 현장에 서 나타나는 백색증은 일반 다른 어종에서 관찰되는 것과 마찬가지로 강한 유전력을 지닌 것으로 확인되고 있다. 이것은 통상적으로 백색증은 먹이원의 영양과 사육환경에 영향을 받는다는 통념을 깨뜨리는 사실에 속한다. 따라서 앞으로의 연구는 이러한 백색증의 유전력이 서식환경과 먹이원의 영양과 어떠한 연관 관계를 지니며 발현되는지에 관한 유전생화학 적 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 본다.

현재까지 국내에서 넙치의 체색이상개체에 관한 연구가 전무한 실정에서 비록 유전적 연관성은 확인하지 않았지만 사육환경과 먹이원 영양조절에 따라 백색증을 어느 정도 제어할 수 있다는 가능성을 이 실험들을 통해 확인할 수 있었으며, 백색증 넙치에 대한 속설로 되어오던 몇몇 생물학적 특성도 확인할 수 있었다는데 의의가 있다고 본다. 본 연구에서 넙치 백색증 개체는 상품크기까지 성장하여도 백색증의 흔적이 남는 특성을 지니는 것으로 나타났으므로 특히, 연안자원 조성을 위한 방류용 종묘의 경우 자연계로 백색증의 넙치 치어 들이 유입되는 일은 없어야 할 것이다. 이것은 연안 넙치 자원의 유전형질 보전을 위한 최소한의 노력이라 하겠다.

사 사

본 연구는 2001년~2003년까지 “국립수산물과학원 경상과제-온대성생물 종묘생산 기술개발 (수산생물의 종보존 및 양식대 상종 연구)” 및 2006년~2009년까지 “한국해양수산기술진흥원 수산특정연구개발 과제 (F10600906A220000110)”에 의해 수행된 결과로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Benetti, D.D. 1997. Spawning and larval husbandry of flounder *Paralichthys woolmani* and Pacific yellow-tail *Seriola mazatlanana*, new candidate species for aquaculture. *Aquaculture*, 155, 307-318.
- Bolker, J.A. and C.R. Hill. 2000. Pigmentation development in hatchery-reared flatfishes. *J. Fish Biol.*, 56, 1029-1052.
- Daniels, H., D.L. Berlinsky, R.G. Hodson and C.V. Sullivan. 1996. Effects of stocking density, salinity, and light intensity on growth and survival of southern flounder *Paralichthys lethostigma* larvae. *J. World Aquacult. Soc.*, 27, 153-159.
- Denson, M.R. and T.I.J. Smith. 1997. Diet and light intensity effects on survival, growth and pigmentation of southern flounder *Paralichthys lethostigma*. *J. World Aquacult. Soc.*, 28, 366-373.
- Devresse, B., P. Leger, P. Sorgeloos, O. Murata, T. Nasu, S. Ikeda, J. Rainuzzo, K. Reitan, E. Kjorsvik and Y. Olsen. 1994. Improvement of flatfish pigmentation through the use of DHA-enriched rotifers and *Artemia*. *Aquaculture*, 124, 287-288.
- Dhert, P., P. Lavens, M. Dehasque and P. Sorgeloos. 1994. Improvements in the larviculture of turbot *Scophthalmus maximus*: zootechnical and nutritional aspects, possibility for disease control. In: *European Aquacult. Soc., Special Publ. 22*, Lavens, P. and Remmerswall, R.A.M., eds., 32-46.
- Diggles, B.K. 2000. Chemotherapy of the ciliate *Trichodina* sp. on juvenile turbot (*Colistium nudipinnis*) with notes on the susceptibility of fish with abnormal pigmentation. *New Zeal. J. Mar. Freshwater Res.*, 34, 645-652.
- Ellis, T., B.R. Howell and R.N. Hughes. 1997. The cryptic responses of hatchery-reared sole to a natural sand substratum. *J. Fish Biol.*, 51, 389-401.
- Estévez, A. 1996. Effects of lipids and vitamin A on pigmentation success of flatfish. Ph. D. Thesis. Kagoshima University, Japan, 1-160.
- Fukusho, K., T. Yamamoto and T. Seikai. 1986. Influence of various amounts of aeration during larval development of hatchery-reared flounder *Paralichthys olivaceus* on the appearance of abnormal coloration. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult.*, 10, 53-56.
- Fujii, R. and N. Oshima. 1986. Control of chromatophore movements in teleost fishes. *Zool. Sci.*, 3, 13-47.
- Furuta, S. 1998. Comparison of feeding behavior of wild and hatchery-reared Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*, juveniles by laboratory experiments. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 64, 393-397.
- Furuta, S., T. Watanabe and H. Yamada. 1998. Predation by fishes on hatchery-reared Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* juveniles released in coastal area of Tottori prefecture. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 64, 1-7.
- Gartner, J.V. 1986. Observations on anomalous conditions in some flatfishes Pisces: Pleuronectiformes, with a new record of partial albinism. *Environ. Biol. Fish.*, 17, 141-152.
- Hamre, K., M. Morena, J. Solbakken, I. Opstad and K. Pittman. 2005. The impact of nutrition on metamorphosis in Atlantic halibut (*Hippoglossus*

- hippoglossus* L.). *Aquaculture*, 250, 555-565
- Howell, B.R. 1994. Fitness of hatchery-reared fish for survival in the sea. *Aquacult. Fish. Manag.*, 25, 3-17.
- Imsland, A.K., T. Wergeland, T.M. Jonassen and S.O. Stefansson. 2006. Does malpigmentation improve growth in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* Rafinesque) and halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.)? *Aquacult. Res.*, 37, 306-312
- Iwata, N. and K. Kikuchi. 1998. Effects of sandy substrate and light on hypermelanosis of the blind side in cultured Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Environ. Biol. Fish.*, 52, 291-297.
- Kanazawa, A. 1991. Nutritional mechanisms causing abnormal pigmentation in cultured marbled sole larvae, *Limanda yokohamae* (Heterosomata). In: Larvi '91, Fish and Crustacean Larviculture Symp., Lavens, P., Sorgeloos, P., Jaspers, E. and Olivier, F., eds. Gent, Belgium, Special Pub., 15, 20-22.
- Kanazawa, A. 1993. Nutritional mechanisms involved in the occurrence of abnormal pigmentation in hatchery-reared flatfish. *J. World Aquacult. Soc.*, 24, 162-166.
- Matsumoto, J. and T. Ishii. 1986. Induction of melanophore development in plaice juveniles by ultraviolet irradiation. In: Structure and Function of Melanin. Vol. 3, Jimbow, K., ed. Fujii-Shoin, Sapporo, Japan, 75-81.
- Matsumoto, J. and T. Seikai. 1992. Asymmetric pigmentation and pigment disorders in Pleuronectiforms (flounders). *Pigment Cell Res. Suppl.*, 2, 275-282.
- Næss, T. and Ø. Lie. 1998. A sensitive period during first feeding for the determination of pigmentation pattern in Atlantic halibut, *Hippoglossus hippoglossus* L., juveniles: the role of diet. *Aquacult. Res.*, 29, 925-934.
- Nakamura, K., H. Iida and H. Nakano. 1986. Riboflavin in the skin of albinic flatfish *Liopsetta obscura*. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 52, 2207.
- Purchase, C.F., D.L. Boyce and J.A. Brown. 2002. Occurrence of hypomelanization in cultured yellow-tail flounder *Limanda ferruginea*. *Aquacult. Res.*, 33, 1191-1193.
- Ramachandran, V.S., C.W. Tyler, R.L. Gregory, D. Rogers-Ramachandran, S. Duesing, C. Pillsbury and C. Ramachandran. 1996. Rapid adaptive camouflage in tropical flounders. *Nature*, 379, 815-818.
- Roberts, R.J., H. Young and J.A. Milne. 1971. Studies on the skin of plaice *Pleuronectes platessa* L.: 1. The structure and ultrastructure of normal plaice skin. *J. Fish Biol.*, 4, 87-98.
- Seikai, T. and J. Matsumoto. 1991. Mechanisms of albinism in flatfish with regard to pigment cells and skin differentiation. *Euro. Aquacult. Soc.*, 15, 328-330.
- Seikai, T. and J. Matsumoto. 1994. Mechanism of pseudoalbinism in flatfish: an association between pigment cell and skin differentiation. *J. World Aquacult. Soc.*, 25, 78-85.
- Seikai, T. 1985a. Influence of feeding periods of Brazilian *Artemia* during larval development of hatchery-reared flounder *Paralichthys olivaceus* on the appearance of albinism. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 51, 521-527.
- Seikai, T. 1985b. Reduction in occurrence frequency of albinism in juvenile flounder *Paralichthys olivaceus* hatchery-reared on wild zooplankton. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 51, 1261-1267.
- Seikai, T. 1991. Influences of fluorescent light irradiation, ocular side pigmentation, and source of fishes on the blind side pigmentation in the young Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Suisan Zoshoku*, 39, 173-180.
- Seikai, T. 1992. Process of pigment cell differentiation in skin on the left and right side of the Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*, during metamorphosis. *Jap. J. Ichthyol.*, 29, 85-92.
- Seikai, T., M. Shimozaki and T. Watanabe. 1987a. Estimation of larval stage determining the appearance of albinism in hatchery-reared juvenile flounder *Paralichthys olivaceus*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, 1107-1114.
- Seikai, T., T. Watanabe and M. Shimozaki. 1987b. Influence of three geographically different strains of *Artemia nauplii* on occurrence of albinism in hatchery-reared flounder *Paralichthys olivaceus*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, 195-200.
- Seikai, T., J. Matsumoto, M. Shimozaki, A. Oikawa and T. Akiyama. 1987c. An association of melanophores appearing at metamorphosis as vehicles of asymmetric skin color formation with pigment anomalies developed under hatchery conditions in the Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Pigment Cell Res.*, 1, 143-151.
- Shikano, T. 2005. Marker-based estimation of heritability for body color variation in Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture*, 249, 95-105.
- Sugiyama, M., H. Nakano, Y. Yano, M. Fukuda and N. Murakami. 1985. Studies on the culturing technique for flatfish larvae: I. The effect of rate of water supply into rearing tank on the abundances of albinism and reversal larvae. *Bull. Hokkaido Reg. Fish. Res. Lab.*, 50, 63-69.

- Suzuki, N. 1994. Ultrastructure of the skin on reverse side of hatchery-reared Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*, with reference to the pigmentation. Bull. Nansei Natl. Fish. Res. Inst. Nanseisuikenho, 27, 113-128.
- Takahashi, Y. 1994. Influence of stocking density and food at late phase of larval period on hypermelanosis on the blind body side in juvenile Japanese flounder. Nippon Suisan Gakkaishi, 60, 593-598.
- Takeuchi, T., J. Dedi, C. Ebisawa, T. Watanabe, T. Seikai, K. Hosoya and J. Nakazoe. 1995. The effect of beta-carotene and vitamin A enriched *Artemia* nauplii on the malformation and color abnormality of larval Japanese flounder. Fish. Sci., 61, 141-148.
- Yamamoto, T., K. Fukusho, M. Okauchi, H. Tanaka, W.D. Nagat, T. Seikai and T. Watanabe. 1992. Effects of various foods during metamorphosis on albinism in juvenile of flounder. Nippon Suisan Gakkaishi, 58, 499-508.

2007년 5월 15일 접수

2007년 8월 14일 수리