

어류 가두리용 동합금망의 내부식성에 관한 연구

조대연 · 이지훈[†]

전남대학교(학생) · [†]전남대학교(교수)

A Study on Corrosion Resistance of Copper Alloy Nets for the Fish Cages

Daeyeon CHO · Jihoon LEE[†]

Chonnam National University(student) · [†]Chonnam National University(professor)

Abstract

In offshore cage aquaculture, biofouling on synthetic fiber nets increases load and obstructs water flow, leading to reduced operational efficiency. To address this issue, research on replacing traditional synthetic fiber nets with copper alloy nets has been actively conducted. In this study, the corrosion resistance of two types of copper alloy nets(A, B) was evaluated through cyclic corrosion tests, immersion corrosion tests, and leaching tests. The results showed that copper alloy net(B) exhibited higher corrosion resistance in the cyclic corrosion test but had a greater mass loss in the immersion corrosion test, indicating that corrosion resistance varies depending on the environmental conditions. Both nets underwent uniform corrosion without pitting or cracking, and the leaching test revealed high concentrations of Ni, Cu, and Zn. This study provides fundamental data for the practical application of brass nets in offshore aquaculture cages, highlighting the need for further research on corrosion resistance improvements and environmental impact assessments.

Key words : Fish cage, Copper alloy net, Biofouling, Corrosion resistance, Leaching test

I. 서론

국내 양식어업은 2006년을 기준으로 생산량이 약 120만 톤으로 같은 해에 약 110만 톤의 생산량을 기록한 연근해 어업의 생산량을 추월하였다. 2017년을 기점으로 국내 양식어업의 생산량은 약 200만 톤을 넘게 되었으며 2019년에는 약 241만 톤으로 최대 생산량을 기록한 후 지속적인 감소로 인해 2024년에는 이보다 약 10%가 감소한 약 224만 톤의 생산량을 나타냈다(KOSIS, 2025). 이러한 생산량 변화를 통해 알 수 있듯이 양식업의 생산성의 한계가 나타나고 있다. 특히 해상 가두리 양식은 시설의 노후화, 수질 환경의

악화, 양식장 폐기물 처리 문제, 그리고 환경적 부담 증가 등의 구조적 문제로 인해 운영의 효율성이 저하되고 있다(Kim and Park, 2024). 이러한 문제는 생산 비용 상승 및

품질 관리의 어려움으로 이어지며 양식 어류의 생산성 감소를 초래할 수 있다. 따라서 지속적인 양식업의 성장에도 불구하고 경쟁력 확보에 어려움을 겪고 있으며 보다 효율적인 가두리 시스템의 도입이 요구된다.

이러한 가두리 양식장의 생산 효율성 저하의 주요 원인 중 하나는 기존 가두리 양식 시스템의 구조적 문제이다. 기존 해상 가두리의 경우 직조 나일론 그물을 사용하는데 이는 시간이 지남에

[†] Corresponding author : 061-659-7123, jihoon.lee@jnu.ac.kr

따라 미생물 부착 현상(biofouling)으로 인해 유체 저항이 증가하는 단점이 있다. 이러한 생물 부착으로 인해 그물의 항력은 최대 240%까지 증가하게 되며 항력 증가 패턴은 생물 부착의 종류에 따라 다르다(Swift et al., 2006). 또한 가두리 그물에 따개비, 미생물 등이 부착되면 그물망의 투영면적의 크기가 늘어나 유체 저항이 증가하고 해수 교환이 원활하게 되지 않는다. 이는 산소 공급 저하, 수질 악화 등으로 이어지며 결과적으로 가두리 시스템의 전체적인 효율성을 저하시킨다(Shirakshi et al., 2024). 따라서 기존 가두리 시스템의 문제를 개선하고 생산성을 향상시키기 위해 미생물의 부착 현상을 억제할 수 있는 동합금망을 활용한 양식장 운영이 대안으로 제시되고 있다. 동합금망은 구리 합금에서 방출되는 구리 이온(Cu^{2+})을 통해 미생물 부착을 억제하며 기존 직조 그물보다 구조적으로 안정적이므로 양식장의 생산성 향상과 경제적 효율성을 높이는 대안으로 주목받고 있다(Ashraf and Edwin, 2016). 동합금망과 관련된 선행 연구로는 동합금망의 초기 구리 방출량과 장기적인 안정성을 분석하고 퇴적물 내 구리 축적이 기존 방오 처리된 나일론망보다 적어 환경적 지속 가능성을 제시한 연구(Kalantzi et al., 2016), 동합금망이 기존 폴리머 소재보다 내구성이 우수하며 해양 환경에서 장기적인 운용 가능성을 제시한 연구(Drach et al., 2016), 동합금망의 공극률과 영각이 유체 저항 및 유속 감소에 미치는 영향을 분석한 연구(Kang and Lee, 2019), 동합금망을 적용한 가두리 시스템의 유체역학적 성능과 계류 부하를 평가한 연구(Cha and Lee, 2018), 동합금망과 기존 직조 그물의 유체 저항 차이를 분석한 연구(Cha et al., 2013) 등이 있다. 그러나 동합금망의 내구성과 부식 특성에 대한 연구는 아직 부족하며, 이를 실용화하기 위한 추가적인 검토가 필요하다.

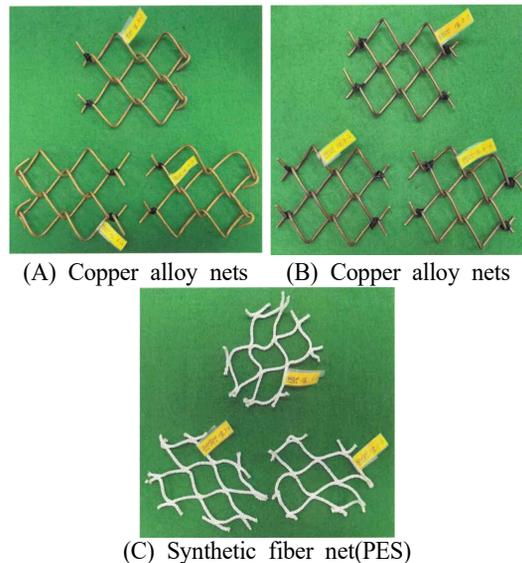
본 연구에서는 어류 가두리에 적용하기 위한 동합금망의 내부식성을 평가하고 이러한 부식에 따른 용출물을 분석한다. 이를 바탕으로 황동 어

망 가두리의 실용화를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시험 재료

본 연구에서는 국내 업체 2곳에서 가두리 양식용으로 개발 및 생산한 동합금망 2종(A, B; l: 45mm, d: 4.5mm)과 합성 섬유(PES망; l: 45mm, d: 4.5mm)의 내부식성을 평가하고, 부식 저항성과 물리적 특성을 비교 분석하였다. 이때 사용된 동합금망 2종은 제조사가 서로 상이하여 합금 구성 비율에 있어서 구성 원소별 차이가 존재한다. 각 시험에 사용된 모든 시험편은 측정 오차를 줄이기 위해 [Fig. 1]과 같이 각 시험편에 대하여 동일한 크기(가로, 세로 : 10cm)의 3개의 샘플을 만들어 진행하였다.



[Fig. 1] Test specimens used in each experiment.

2. 시험 방법

동합금망의 내부식성 및 내구성을 평가하기 위해 복합부식시험, 침지부식시험, 용출물 시험을

수행하였으며 모든 시험은 관련 국제 및 국내 표준을 준용하여 한국화학융합시험연구원(Korea Testing & Research Institute)의 조선해양센터(울산, 대한민국)에서 진행되었다.

가. 복합부식시험(Cyclic Corrosion Test; CCT)

동합금망(A, B)과 합성섬유망(PES 망)의 부식 저항성을 평가하기 위하여 「KS D ISO 14493 : 2018」의 규격에 따라 복합부식시험을 수행하였으며 상세 시험 조건은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Experimental conditions of the CCT(1 cycle).

Experimental conditions	Specifications	Exposure time
Salt spray	(35 ± 2)℃, 50 g/L NaCl	2h
Drying	(60 ± 2)℃, < 30 % R.H.	4h
Humidity	(50 ± 1)℃, (95 ± 5)% R.H.	2h

본 시험은 습윤 및 건조 조건을 포함한 90 사이클(1사이클 = 8시간, 염수분무-건조-습윤)동안 노출하여 실험실에서 제어된 가속 부식을 유도하였다. 복합부식 시험장비는 CCT-1LZ(Suga Test Instruments Co., Ltd., Tokyo, Japan)를 사용하였다 ([Fig. 2] 참조). 시험 후 각 시험편의 시험 전, 후 중량을 측정하여 식(1)과 같이 중량 변화율을 계산하였으며 3개의 평균값을 산출하였다. 부식 생성물 제거는 「KS D 9502:2020」 규격에 따라 진행하였다.



[Fig. 2] Cyclic corrosion test equipment(CCT-1LZ) used for the experiment.

Weight change rate (%) =

$$\frac{\text{Initial weight (g)} - \text{Final weight (g)}}{\text{Initial weight (g)}} \times 100 \dots (1)$$

나. 침지부식시험(Immersion Corrosion Test)

동합금망의 부식 저항성을 평가하기 위해 ASTM G31-21 Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals 규격에 따라 침지부식시험을 수행하였다([Fig. 3] 참조).



[Fig. 3] Immersion corrosion test setup following ASTM G31-21 standard.

본 시험은 1% CuCl₂ 용액에서 시험편을 (75 ± 1)℃의 온도로 24시간 동안 완전 침지하여 진행되었다(<Table 2> 참조). 제공된 시험편은 순차적으로 연마하고 증류수 및 아세톤으로 표면의 이물질을 제거한 뒤, 초음파 세척을 실시하고, 건조하여 0.1mg 범위에서 중량을 측정하였다. 내식성 평가 방법으로 침지부식시험 종료 후, 시험편의 부식 생성물을 제거한 뒤, 각 시험편의 중량감량을 평가하였다.

<Table 2> Experimental conditions of the Immersion Corrosion Test

Test Solution	Immersion Time	Solution Temperature
CuCl ₂	24h	(75 ± 1)℃

다. 용출물 시험(Leaching Test)

해양 환경에서 동합금망의 금속 성분 용출 특성을 평가하기 위해 APHA Standard Method:2022

에 따라 용출물 시험을 수행하였다. 본 시험은 인공 해수(32 %)에 시험편을 30일간 완전 침지한 후, 해수 중에 용출된 금속 원소를 분석하는 방식으로 진행되었다. 침지 후 SeaFast/ICP-MS (ESI, Omaha, USA)를 이용하여 구리(Cu), 아연(Zn), 주석(Sn), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 코발트(Co), 안티모니(Sb), 알루미늄(Al)의 농도를 분석하였으며, 해수공정시험기준(2023)에 따라 885 nm 파장에서 수질 자동 분석기인 무기이온검출기 Futra 3(AMS Alliance, Guidonia, Italy)를 사용하여 총 인(P) 함량을 분석하였다([Fig. 4] 참조).



(A) SeaFast ICP-MS(ESI, Omaha, USA)



(B) NexION 2000B(PerkinElmer, Waltam, USA)



(C) Futura 3(AMS Alliance, Guidonia, Italy)

[Fig. 4] Leaching test equipment used for the experiment.

용출 시험 조건은 <Table 3>과 같으며 실험을 위해 인공 해수 용액을 제조하였다. 또한, 디지털

항온수조를 이용하여 시험 용액의 온도를(16 ± 1)℃로 일정하게 유지하였으며, 총 시험 기간은 30일이다. 용출 기간 종료 후, 항온수조에 남아있는 인공 해수를 샘플링하여 용출 전·후 시료를 분석하였다.

<Table 3> Experimental conditions of the Leaching Test

Test Solution	Immersion Time	Solution Temperature
Artificial Seawater ("Sea-salt" ASTM D 1141-98m, Formula A, Table X1.1)	30 Days	(16 ± 1)℃

Ⅲ. 연구 결과

동합금망을 이용한 가두리 양식의 경우 구조적 안정성과 유지보수 비용뿐만 아니라 양식 어류와 해양 환경에 미치는 영향도 고려해야 한다. 해수에서의 부식은 망의 강도 저하와 구조적 파손을 유발하여 양식 어류의 탈출 및 경제적 손실로 이어질 수 있으며, 부식된 동합금망에서 방출된 구리(Cu) 및 아연(Zn)과 같은 금속 이온은 어류 건강과 해양 생태계에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 본 연구에서는 동합금망 자체의 내부식성을 분석하였으며, 용출물에 의한 어류의 영향은 고려하지 않았다.

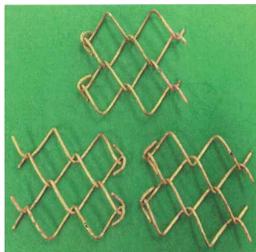
본 연구에서는 가두리용 동합금망 2종(A, B)의 내식성을 평가하기 위해 복합부식시험, 침지부식 시험, 용출물 시험을 수행하였으며, 이를 통해 동합금망의 부식 저항성과 금속 성분 용출 특성을 분석하였다.

1. 복합부식시험 결과

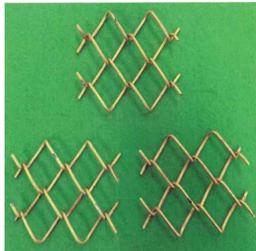
90 Cycles 조건 노출 후 3종의 시험편 중량 변화 결과는 <Table 4>와 같다. 시험 후 시험편의 모습은 [Fig. 5]와 같다.

<Table 4> Weight loss of specimens according to cyclic corrosion test results(90 Cycles)

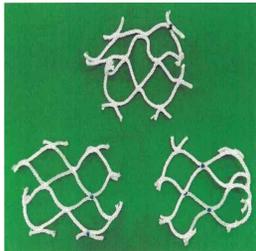
Specimen	No.	Initial weight(g)	Final weight(g)	Weight change rate(%)
Copper alloy net (A)	1	157.068	156.809	0.164
	2	164.436	164.135	0.182
	3	163.064	162.776	0.176
	Average	161.522	161.240	0.174
Copper alloy net (B)	1	120.780	120.628	0.126
	2	123.433	123.280	0.123
	3	123.309	123.136	0.140
	Average	122.508	122.348	0.130
Synthetic fiber net (PES)	1	5.236	5.234	0.043
	2	2.262	5.259	0.045
	3	4.705	4.702	0.053
	Average	5.068	5.065	0.047



(A) Copper alloy net after testing



(B) Copper alloy net after testing



(C) Synthetic fiber net after testing(PES)

[Fig. 5] Specimens after Cyclic Corrosion Test.

동합금망(A)의 경우 3개의 평균 시험 전 무게는 161.522g, 90 Cycles 조건노출 후 무게는 161.240g으로 평균 증량 변화율은 0.174%로 나타났다. 동합금망(B)의 경우 3개의 평균 시험 전 무게는 122.508g, 90 Cycles 조건노출 후 무게는 122.348g으로 평균 증량 변화율은 0.130%로 나타났다.

PES 망의 경우 3개의 평균 시험 전 무게는 5.068g, 90 Cycles 조건 노출 후 무게는 5.065g으로 측정되었으며 평균 증량 변화율은 0.04%로 나타났다.

동합금망 2종을 비교한 결과 동합금망(A)가 동합금망(B)보다 증량 감소율이 높아 상대적으로 더 많은 부식이 발생하였으며 동일한 복합부식시험조건에서 동합금망(B)가 더 높은 내식성을 보이는 것으로 판단된다. PES망은 비금속 재료로 부식이 거의 발생하지 않았으며 동합금망과 비교할 때 합성섬유망은 상대적으로 높은 부식 저항성을 나타냈다.

2. 침지부식시험 결과

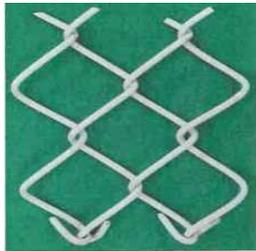
(75 ± 1)°C의 1% CuCl₂ 용액 중 동합금망 시험편(A, B)에 대하여 24시간 침지 후 증량 변화 결과는 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Demographic characteristics of the respondents

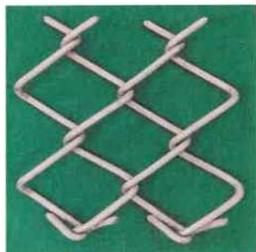
Specimen	No.	Initial weight(g)	Final weight(g)	Weight change rate(%)
Copper alloy net (A)	1	158.358	158.135	0.140
	2	162.202	161.959	0.150
	3	158.930	158.698	0.146
	Average	159.830	159.597	0.145
Copper alloy net (B)	1	127.079	122.959	3.242
	2	130.134	125.992	3.183
	3	130.336	126.294	3.102
	Average	129.183	125.082	3.175

동합금망(A)의 경우 3개의 평균 시험 전 무게는 159.830g이며 침지부식시험 후 무게는 159.597g으로 평균 중량 변화율은 0.145%로 나타났다. 동합금망(B)의 경우 3개의 평균 시험 전 무게는 129.183g이며 침지부식시험 후 무게는 125.082g로 평균 중량 변화율은 3.175%로 나타났다.

두 동합금망 모두 부식시험 후 공식(pitting)과 같은 국부 부식 및 균열은 발생하지 않았으며 전체적으로 부식이 발생하는 균일부식의 형태로 부식되었다([Fig. 6] 참조).



(A) Copper alloy net after testing



(B) Copper alloy net after testing

[Fig. 6] No.1 Specimens after Immersion Corrosion Test.

3. 용출물 시험 결과

(16 ± 1)°C의 인공해수 중 동합금망 시험편 2종과 용출 전 시료에 대하여 30일 간의 침지에 따른 용출물 농도를 각 원소마다 계산하였다 (<Table 6> 참조).

<Table 6> Concentration of each inorganic element according to the artificial seawater leaching test

Test item	Concentration(μg/L)		
	Before leaching	After leaching A	After leaching B
Cr	-	-	-
Al	1.11	0.988	1.58
Sn	0.087	0.118	0.136
Co	0.073	0.129	0.113
Ni	0.805	28.0	25.1
Cu	0.715	1128	1398
Zn	232	4155	2134
Sb	0.992	1.07	1.20
TP (mg/L)	1.76	1.80	1.74

Cr은 용출 전 및 용출 후 샘플 모두 불검출되었다. Al, Sn, Co, Sb의 용출 전, 후 농도 차이는 동합금망 A에서 각각 0.122, 0.031, 0.056, 0.078 μg/L로 나타났으며 동합금망 B에서는 각각 0.47, 0.049, 0.04, 0.208 μg/L로 확인되었다. 따라서 용출 전에 비해 용출 후 농도는 유의미한 증가가 나타나지 않았다. 반면 Ni, Cu, Zn의 용출 전, 후 농도 차이는 동합금망 A의 경우 27.195,

1127.285, 3923 $\mu\text{g/L}$ 이며 동합금망 B의 경우 24.295, 1397.285, 1902 $\mu\text{g/L}$ 로 용출 전에 비해 용출 후 샘플의 농도가 급격하게 증가하였다.

IV. 결론

해상 가두리 양식에서는 합성섬유로 제작된 어망을 사용할 경우 부작생물로 인한 하중 증가 및 조류 흐름 방해 등의 문제점이 발생하며, 이를 해결하기 위한 다양한 기술이 개발되고 있으나 명확한 해결책이 제시되지 않고 있다. 이에 따라 동합금망을 가두리 어망으로 적용하는 연구가 진행되었으며 본 연구에서는 동합금망 2종(A, B)의 내식성을 평가하여 가두리 양식장에서의 적용에 따른 문제점에 대하여 검토하였다.

복합부식시험과 침지부식시험 결과, 동합금망(B)는 동합금망(A)에 비해 복합부식시험에서는 상대적으로 높은 내식성을 보였으나, 침지부식시험에서는 더 높은 중량 감소율을 나타냈다. 이는 부식 환경에 따라 동합금망의 내식성이 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 특히, 침지 부식 시험에서 동합금망(B)의 중량 변화율이 약 3%로 매우 높게 나타났다. 두 동합금망 모두 국부 부식(Pitting)이나 균열(Cracking) 없이 균일 부식 형태로 진행되었다. 동합금망 가두리의 경우 제작 비용이 일반 합성 섬유 그물을 사용하여 제작한 가두리에 비하여 높으나, 사용 후 동합금망 가두리의 회수 및 재처리를 통한 리사이클링 가능하여 가격적인 단점을 상쇄시킬 수 있으며 앞서 언급된 방오 능력을 동합금망 가두리의 장점으로 들고 있다. 하지만, 실험 결과 중량 감소율이 높게 나타나 리사이클링에 의한 충분한 경제적 부담 경감이 가능한가에 대하여서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한 용출물 시험 결과 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn)의 농도가 상대적으로 높게 검출되었다. 또한, 주석(Sn)이 타 원소보다 용출되는 양은 작았

으나 증가율은 시험 후 동합금망(A, B)에서 각각 35.6%, 56.3%로 높게 분석되었다. 선행연구(Kalantzi et al., 2016)에 따르면 동합금망에서 방출된 금속 이온이 양식 어류 조직 내 일부 축적되었으나, 이는 기존 연구에서 제시된 안전 기준을 초과하지 않았으며, 퇴적물 내 구리 농도 또한 기존 방오제 처리된 나일론망보다 낮은 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 동합금망이 주변 해양 환경에 미치는 영향이 상대적으로 적을 수 있음을 시사한다. 그러나 동합금망의 장기적 사용에 따른 환경 영향과 용출물이 양식 어류에 미치는 생리학적 영향을 완전히 배제할 수는 없으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 특히, 본 연구는 단기적인 용출물 시험만을 수행하였기 때문에 실제 장기적인 환경 영향을 충분히 반영하지 못하였으며, 연구 결과에 대한 통계적 검증이 이루어지지 않아 결과의 신뢰성 측면에서도 한계가 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 장기간에 걸친 용출 특성 평가와 더불어 실험 결과에 대한 통계적 검증을 병행함으로써 연구의 신뢰성과 타당성을 보다 향상시킬 필요성이 있다.

이러한 한계에도 불구하고, 본 연구의 결과를 통해 도출한 동합금망의 부식 특성과 용출물 방출량은 동합금망 가두리 양식 시스템 실용화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

Ashraf P.M and Edwin L(2016). Nano copper oxide incorporated polyethylene glycol hydrogel: An efficient antifouling coating for cage fishing net. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 115, 39-48.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.07.015>.
 Cha BJ, Kim HY, Bae JH, Yang YS and Kim DH(2013). Analysis of the hydrodynamic characteristics of chain-link woven copper alloy nets for fish cages. *Aquacultural Engineering*, 56,

- 79~85.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.05.002>.
- Cha Bj and Lee GH(2018). Performance of a model fish cage with copper-alloy net in a circulating water channel and wave tank. *Ocean Engineering* 151, 290~297.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.053>.
- Drach A, Tsukrov I, DeCew J and Celikkol B(2016). Engineering procedures for design and analysis of submersible fish cages with copper netting for exposed marine environment. *Aquacultural Engineering*, 70, 1~14.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.11.001>.
- Kang AR and Lee Jh(2019). A study on flow velocity reduction and hydrodynamic characteristics of copper alloy netting by solidity ratios and attack angles. *J Korean Soc Fish Ocean Technol*, 55(1): 62~73.
<https://doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.1.062>.
- Kalantzi I, Zeri C, Catsiki V, Tsangaris C, Stroglyoudi E, Kaberi H, Vergopoulos N and Tsapakis M(2016). Assessment of the use of copper alloy aquaculture nets: Potential impacts on the marine environment and on the farmed fish. *Aquaculture*, 465, 209~222.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.09.016>.
- Kim GW and Park SB(2024). Evaluation of brass weaving fishing net for aquaculture cage applications. *J Korean Soc Fish Ocean Technol*, 60(2): 186~193.
<https://doi.org/10.3796/KSFOT.2024.60.2.186>.
- KOSIS(2025). Comprehensive Summary by Type of Fishery and Fishing Method, Fishery Production Trend Survey, Fisheries.
<http://https://kosis.kr/index/index.do> on March 7.
- Shirakashi S, Kokaji R and Miura M(2024). Effects of copper alloy and antifouling-coated nets on the attachment and hatching of monogenean eggs. *Aquaculture*, 588.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2024.740954>.
- Swift M. R, Fredriksson D W., Unrein A, Fullerton B, Patursson O and Baldwin K(2006). Drag force acting on biofouled net panels. *Aquacultural Engineering*, 35, 292~299.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.03.002>.
-
- Received : 31 March, 2025
 - Revised : 21 April, 2025
 - Accepted : 28 April, 2025