

수조 실험에 의한 삼중자망의 뜬줄 높이에 대한 수치해석

박해훈* · 원성재¹ · 양준용² · 배재현³ · 윤홍근¹

국립수산과학원 동해수산연구소 자원관리조성팀 · ¹백경공업(주)

²국립수산과학원 해양연구팀 · ³국립수산과학원 수산공학팀

Numerical analysis on the headline heights of a trammel net in a flume tank experiment

Hae-Hoon PARK*, Sung-Jae WON¹, Joon Yong YANG², Jae-Hyun BAE³ and Hong keun YOON¹

Fisheries Resources management and Enhancement Team, East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangwon 210-861, Korea

¹*Baek Kyung Ind. Co. Ltd., 1515-2 Dadae 1-dong, Saha-gu, Busan 604-826, Korea*

²*Ocean Research Team, NFRDI, Busan 619-902, Korea*

³*Fisheries Engineering Team, NFRDI, Busan 619-902, Korea*

An estimation of the headline height of a bottom trammel net set across under uniform current was achieved numerically from a differential equations describing the forces of the net and compared with the measured value in a flume tank experiment. The analysis on the shape of the bottom trammel net with the headline free was based on the equilibrium equation of the bottom gill net which was modified and slack of the trammel net was varied with net depth as shown in the tank experiment. The differential equations were solved by a forth-order Runge-Kutta method. The estimated headline heights with varied slack was found to be closer than that with constant slack when compared with the actual values.

Key words : Headline height, Trammel net, Slack, Flume tank experiment

서 론

최근 급격한 자원감소로 인하여 지속적인 어업 활동을 유지하기 위한 여러 가지 방법들이 시도되고 있는데, 어획에 직접 사용되는 어구의 성능을 보다 정확하게 파악하는 것은 자원관리와 관련하여 매우 중요하다.

자망 어구는 특정한 크기와 어종에 대하여 선택적이라는 것이 잘 알려져 있다. 이 자망은 수동적(passive) 어구로서 어구 설계, 구성 및 사용이 단순하다는 장점이 있다. 자망 어구의 어획 효율은 어류의 형태, 어군의 수직 수평 분포, 어군 행동 등의 생물학적 요소와 그물코크기, 그물

*Corresponding author: hhpark@nfrdi.re.kr Tel: 82-33-660-8525 Fax: 82-33-661-8513

실 지름, 재료, 성형률 등의 비생물학적 요소에 영향받는다. 특히 자망 어구는 어장 환경에 따라 외력(조류나 해류 등)을 받아 형상이 자유롭게 변하기 때문에 어구 설계시 어구의 상태를 정량적으로 파악할 필요가 있는데, 해저에 고정된 저자망이 흐름 속에서 어떤 그물 형상을 이루며, 뜬줄의 높이는 어느 정도 될 것인가는 유속의 세기, 그물의 뻗친 높이, 그물 재료, 뜬의 크기, 부력, 그물코 크기 등의 조건에 따라 변화한다.

최근까지 그물감이나 자망, 트롤어구 등에 대해서 수조나 현장 실험을 통하여 많은 역학적인 연구가 이루어져 왔다(Tauti, 1934; Chang and Sur, 1982; Fridman, 1986; Matuda, 1988; Stewart, 1988; Losanes et al., 1990; Kim et al., 1991; Park, 1993; Bessoneau and Marichal, 1998; Kim, 1999; Lee et al., 2000; Matuda, 2001; Wan et al., 2002; Lee et al., 2005; Park, 2005, 2006). 최근 동역학적인 연구가 상당히 이루어지고 있지만, 그물코수가 많은 어구를 처리하는데 상당한 시간이 소요된다. 따라서 여러 개의 그물코를 그룹화하여 하나의 그물코로 단순화시켜 처리하기도 하나, 아직 동역학으로 처리하지 못한 부분도 있다.

자망이 수중에서 이루는 어구 높이는 어획 성능과 밀접한 관련이 있고, 서해안 같이 조류가 빠른 곳이나 해류가 있는 흐름 속에 놓여 있는 자망의 높이는 어획 효율에 직접적인 영향을 미친다. 저자망의 뜬줄 높이에 대한 연구는 바다에서 잠수부에 의해 직접 계측하거나 자기기록식 기기를 이용하여 실측하거나 flume tank에서 여러 가지 그물실에 대해 측정된 바가 있다(Stewart, 1988; Kim et al., 1991). 이러한 기기나 flume tank 같은 장비는 쉽게 이용할 수 없다. 그리하여, Matuda(1988)는 저자망의 형상에 대한 미분방정식을 수치계산에 의해 풀 방법과 그가 도출한 흘자망의 높이에 대한 약산식이 상당히 잘 일치한다는 것을 밝혔다. 이때 그는 저면효과를 고려하여 유속을 감소시킨 값을 사용하였다. Losanes et al.(1990)는 이 약산식을 이중망 및 삼

중자망에 대해 확장하여 여러 가지 slack에 대하여 적용한 바 있다. 이때 slack은 어구의 전 깊이에 대해 일정한 값을 적용하였다.

그런데, 삼중자망 어구를 해석하는데 있어서 형상을 나타내는 원래의 미분방정식을 적용하여 어구 높이를 구한 것은 거의 없고, slack을 변화시켜 적용한 경우는 지금까지 연구된 바 없는 것 같다. 더욱이 흘자망의 경우도 역학적으로 국내에 소개된 것이 충분하지 않은 것 같으며, 또한 저자들이 실시한 수조실험에 의하면 삼중자망의 slack은 어구의 깊이에 따라 일정하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 삼중자망의 형상에 관한 미분방정식을 전개하면서, 그물감의 깊이에 따라 단계적으로 자연수값으로 증가하는 slack을 써서 Runge - Kutta법을 이용하여 구한 삼중자망의 추정높이와 수조실험에서 유속에 따라 측정된 높이를 비교 분석하였다.

재료 및 방법

장방형 그물감의 형상에 대한 미분방정식과 수치해

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 흐름 속에 놓인 그물이 흐름과 이루는 각을 θ 라 하자. ρ 는 물의 밀도, C_d 는 그물실의 저항계수, V 는 유속, D 는 그물실의 지름, L 은 그물코의 1발 길이이며, 한 그

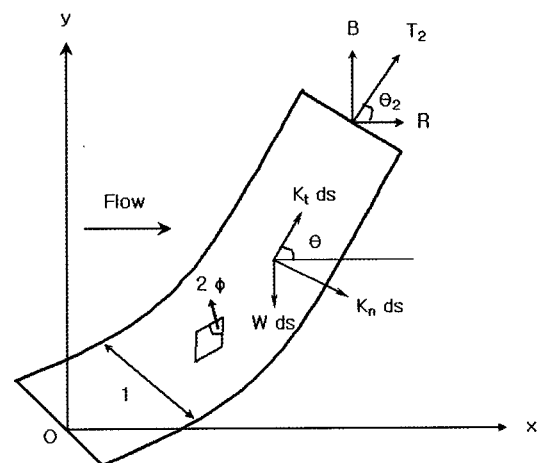


Fig. 1. Forces acting on bottom gill net by a flow.

물코에서 두 발이 이루는 각을 2ϕ 라 하면, 망지가 흐름에 수직으로 놓였을 때 단위 면적당 저항 K 를

$$K = \frac{\rho V^2 C_d}{\sin 2\phi} \left(\frac{D}{L} \right) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있고, 그물감이 받는 저항의 법선 성분 K_n 과 접선 성분 K_t 는, 매듭(결절)저항을 무시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_n = K \sin \theta \quad (2)$$

$$K_t = K \sin^2 \phi \cos \theta = K v \cos \theta \quad (3)$$

단, $v = \sin^2 \phi$ 이고, $C_d = 16 \text{ Re}^{-0.28}$ (Miyazaki, 1964), Re 는 레이놀즈수로서 $\text{Re} = dV/\gamma$, 여기서 $d = 0.5L \sin \phi \cos \phi$, γ 는 동점성계수이다. 또, 그물실의 밀도를 ρ_m , 장섬유 그물실의 solidity를 q 라 하면, 그물감의 단위 면적당 수중 중량 W 는

$$W = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{L} \right) \frac{qD}{\sin \phi \cos \phi} (\rho_m - \rho) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 그리고, 그물감에 유수저항과 수중중량이 작용할 때 성립하는 미분방정식은 (5)-(8)식과 같이 표현된다.

$$\frac{dT}{ds} = -K_t(\theta, V) + W \sin \theta \quad (5)$$

$$T \frac{d\theta}{ds} = K_n(\theta, V) + W \cos \theta \quad (6)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta \quad (7)$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin \theta \quad (8)$$

삼중자망에서 내망과 외망의 인접한 두 발 사이의 각을 각각 $2\phi_i, 2\phi_o$ 라 두고, 내망과 외망의 단위면적당 저항을 K_i 및 K_o , 단위면적당 수중중량을 W_i 및 W_o , 내망의 외망에 대한 slack을 s 라 두면, 삼중자망에 미치는 유수저항의 접선성분 K_{tio} 과 법선성분 K_{nio} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_{tio} = (sK_i v_i + 2K_o v_o) \cos \theta \quad (9)$$

$$K_{nio} = (sK_i + 2K_o) \sin \theta \quad (10)$$

단, $v_i = \sin^2 \phi_i$, $v_o = \sin^2 \phi_o$ 이다. 또한, 수중중량 $W_{io} = sW_i + 2W_o$ 는 로 쓸 수 있다.

삼중자망이 흐름에 수직으로 놓였을 때의 단위 면적당 저항을 K_{io} 라 하면, $K_{io} = sK_i + 2K_o$ 가 되고, 다음과 같은 무차원 변수를 이용하면,

$$\tau = \frac{T}{T_o}, \sigma = \frac{K_{io}}{T_o} s, \zeta = \frac{K_{io}}{T_o} x, \eta = \frac{K_{io}}{T_o} y, \omega = \frac{W_{io}}{K_{io}}$$

삼중자망의 형상과 장력에 관한 무차원화된 식은 (11)-(14)식과 같이 표현된다.

$$\frac{d\tau}{d\sigma} = -v_k \cos \theta + \omega \sin \theta \quad (11)$$

$$\tau \frac{d\theta}{d\sigma} = \sin \theta + \omega \cos \theta \quad (12)$$

$$\frac{d\zeta}{d\sigma} = \cos \theta \quad (13)$$

$$\frac{d\eta}{d\sigma} = \sin \theta \quad (14)$$

단, $v_k = \frac{sK_i v_i + 2K_o v_o}{K_{io}}$ 이다.

위의 미분방정식을 초기조건으로 $\theta = 0$ 때 $\tau = 1$ 을 주어 풀면 다음과 같다.

$$\ln \tau = \frac{\omega^2 + v_k}{\omega^2 + 1} \ln \left(\frac{\omega}{\sin \theta + \omega \cos \theta} \right) + \frac{\omega(1 - v_k)}{\omega^2 + 1} \theta \quad (15)$$

$$\sigma = \int_0^\theta \frac{\tau}{\sin \theta + \omega \cos \theta} d\theta \quad (16)$$

$$\zeta = \int_0^\theta \frac{\tau \cos \theta}{\sin \theta + \omega \cos \theta} d\theta \quad (17)$$

$$\eta = \int_0^\theta \frac{\tau \sin \theta}{\sin \theta + \omega \cos \theta} d\theta \quad (18)$$

그리고, 두 지점(뜰줄과 발줄) 사이의 수직 높이 (h)와 수평 거리 (x), 장력은 다음과 같은 관계가 있다.

$$h = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\tau_2} \frac{T_2}{K_{io}} \quad (19)$$

$$x = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\tau_2} \frac{T_2}{K_{io}} \quad (20)$$

$$T_1 = T_2 \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (21)$$

삼중자망 망지의 유수저항이나 수중 중량을 구할 때, Losanes et al.(1990)은 slack s를 일정한 값으로 적용하였지만, 저자들이 수조 실험한 바에 의하면 slack이 망지의 깊이에 따라 일정하지 않았으므로, 본 논문에서는 slack s를 깊이에 따라 자연수로 증가하는 값을 사용하였다. 수조에서 측정된 삼중자망 뜬줄의 높이를 m, 계산한 삼중망의 높이를 c라 하면, 측정된 값과 계산한 값과의 오차 e를 다음과 같이 나타내었다.

$$e(\%) = \frac{(m - c)}{m} \times 100 \quad (22)$$

사용 어구

수조 실험에 사용한 삼중자망은 서해 연안에서 대하를 주 대상으로 실제 사용되고 있는 자망의 일부분으로서, Fig. 2에서 보는 바와 같이 뽀

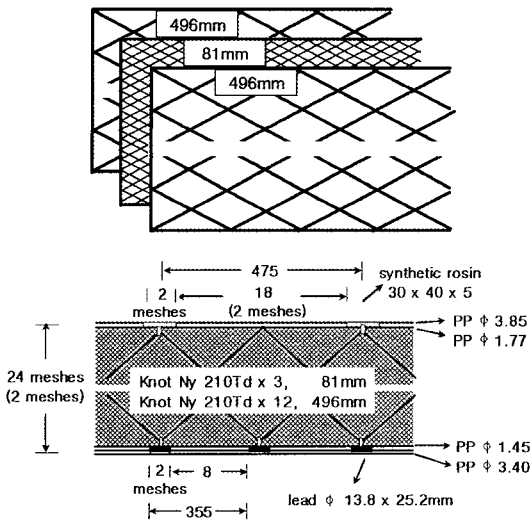


Fig. 2. Specification of a trammel net used in a flume tank experiment.

친 높이는 1.1m, 길이는 사용 수조의 폭에 맞춰 1.425m(뜸의 갯수는 3개)로 하였고, 내망은 나일론 Td 210×3합으로 그물코 크기는 81mm, 외망은 나일론 Td 210×12합, 그물코 크기는 496mm이었다. 내망의 성형률은 29%, 외망의 성형률은 48%였다. 부자(뜸)는 합성수지(밀도는 0.26)로 만들어졌으며 크기는 30×40×5mm인 직육면체였고, 발돌은 납으로 1개의 무게는 24g이었다.

실험방법

본 실험은 백경공업(주)의 수직순환형 회류수조에서 실시하였고, 사용된 실험 수조의 관측부 규격은 7,000×2,000×1,500mm이고, 수심은 1.1m이었으며 유속범위가 0 - 1.0m/s였다(Park et al., 2002).

실험에 사용된 삼중자망의 아랫부분(발줄부)은 얇은 스테인리스 막대(지름 2mm)에 묶어 앞쪽의 고정 지지대에 연결하여 바닥면에 부착시켰다. 따라서, 자망의 발줄은 바닥에 고정된 반면, 상부는 유속에 따라 자유롭게 움직이도록 Fig. 3과 같이 설치되었다. 실험시 유속은 0.05m/s 간격으로 0.3m/s까지 변화시켰다. 그물 형상은 관측창 외부에 설치한 디지털라이저(DT-3000)를 이용하여 측정하였는데, 발줄을 기준으로 뜬줄 외망의 매듭점의 좌표를 측정하였다. 이때의 측정 센서는 rotary encoder였고, 최소 측정 단위는 1mm였다. 2개의 측류 임펠러로 구동되는 이 수조에는 유속분포를 일정하게 유지시키기 위하

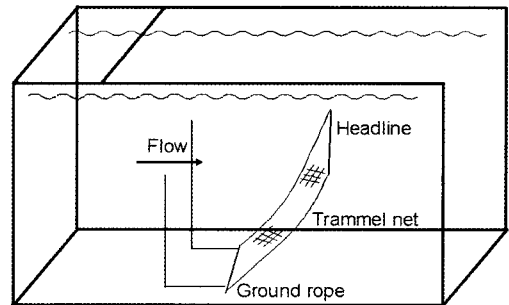


Fig. 3. Experimental set-up for the headline height measurement of a trammel net.

여 상류 쪽에 여러 가지 정류장치가 설치되어 있다. 관측부의 단면유속의 편차는 수면, 수조 바닥, 벽면으로부터 100mm이내를 제외한 구간에서 유속 0.8m/s일 때 ±6%이내였다.

결과 및 고찰

Fig. 4 및 Table 1은 수조 실험에서 유속에 따라 측정된 삼중자망의 높이와 형상 및 계산오차를 나타내었다. 각 기호는 뜰 및 외망의 매듭을 나타낸다. 원점인 0에서 시작하는 가는 점선은 수조 관측창의 아래 부분이 철로 되어 있어 디지

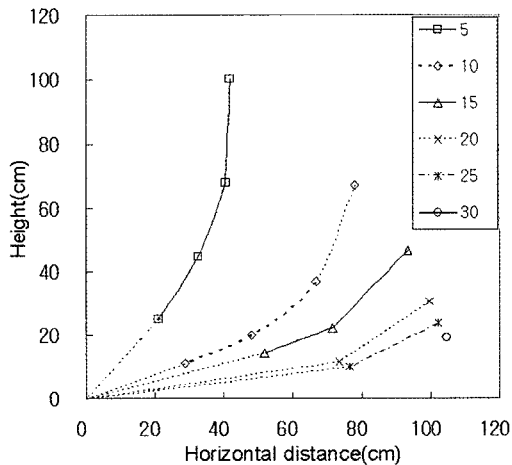


Fig. 4. Apparent curvature of a trammel net under steady flow (flow velocity: 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm/s).

Table 1. Results of the headline height obtained from the measurement in a flume tank experiment and the error by estimation in the current study

Flow speed (cm/s)	Error in headline height calculated (%)		
	s = const. ¹⁾	s = const., ²⁾ (u' = 7/8 × u)	s = var. ³⁾
5	2.2	-1.7 (4.4)	-0.4
10	16.6	2.1 (8.8)	3.0
15	32.0	17.3 (13.1)	12.5
20	32.8	17.8 (17.5)	6.9
25	38.7	24.6 (21.9)	7.9
30	-	31.9 (26.3)	8.7

¹⁾ Slack s was assumed to be constant with net depth.

²⁾ Slack s was assumed to be constant and flow speed was calculated as 7/8 of the original considering bottom effect (Matuda, 1988).

³⁾ Slack s was increased in natural number with net depth.

타이저로 측정하지 못한 부분이였다. Fig. 4에 유속이 증가함에 따라 삼중자망의 뜰줄의 높이는 급격히 감소하는 현상을 나타내었다. 원래의 삼중망 망지의 뾰족 길이(l)에 대해 수조에서 측정된 삼중망 높이(h)의 비율은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유속(V)이 증가함에 따라 그물의 상대 높이(h/l)는 0.91 - 0.22의 범위로 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 그 관계식은 (23)식과 같이 나타났다. 이 경우 유속이 25cm/s로 증가하면 뜰줄의 높이는 초기 높이의 약 22%밖에 되지 않았다. 따라서 서해안과 같이 유속이 강한 곳에서 자망으로 인공어초 효과조사를 할 때에는 거의 저층 부분만을 비교한 결과이고, 바닥에서 다소 뜰 고기에 대해서는 그 효과를 알 수 없다.

$$h/l = 1.2837e^{-0.0733V}, (R^2 = 0.9945) \quad (23)$$

그리고, 흐름 속에 놓인 삼중자망의 힘과 형상에 대한 미분방정식을 풀 경우, slack s를 일정한 값으로 가정하였을 때와 slack을 일정하게 두고 수조의 저면 효과를 고려하여 유속을 측정 유속의 7/8을 적용했을 때(Matuda, 1988) 및 slack을 깊이에 따라 자연수 값으로 변화시켜서 추정된 삼중망의 높이와 수조에서 측정된 높이와의 차

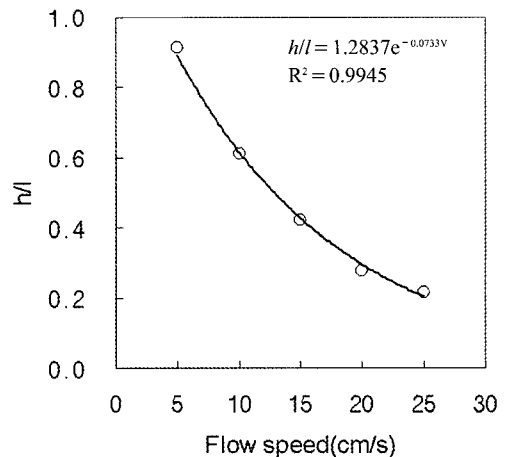


Fig. 5. The relative height of headline in accordance with flow speed.

이를 (22)식에 의하여 Table 1에 나타내었다. 이 표에서 slack을 깊이에 따라 변화시킨 경우가 다른 두 방법보다 상대적으로 오차가 가장 작았음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6은 수조에서 측정된 삼중망의 높이와 본 방법으로 추정된 것이 상당히 잘 일치하고 있음을 보여준다.

그리고, Matuda (1988)는 자망의 아래 끝과 위 끝을 연결한 직선이 흐름과 이루는 각도를 α 라

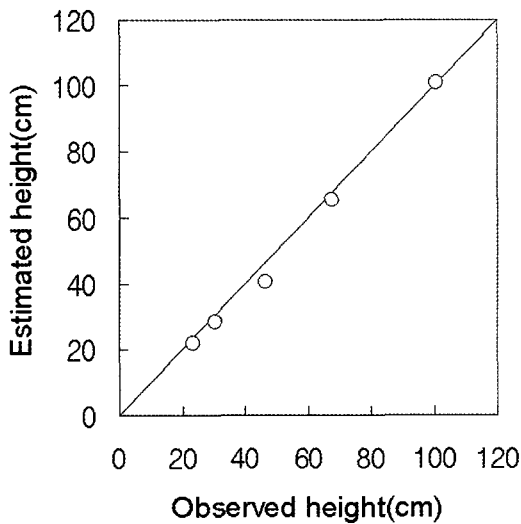


Fig. 6. The relationship between estimated and observed values of the headline height of the trammel net.

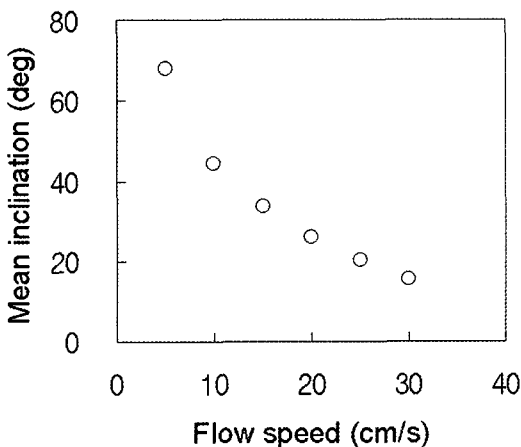


Fig. 7. The relationship of the net inclination angle (α) in accordance with flow speed.

하였는데, 본 실험에서 사용된 삼중자망의 추정된 경사각 α 는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 유속 5cm/s에서 추정된 경사각은 68° 였으나 유속 30cm/s에서는 16° 로 추정되어, 그물은 유속이 증가함에 따라 흐름에 의해 크게 밀려 경사지는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 행한 해석은 자망의 양 끝 이외의 부분에 대해 그물의 높이에 관해서는 일반적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

조류나 해류가 있는 곳에 놓여 있는 자망의 높이는 어획 효율에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 삼중 저자망의 형상에 대한 미분방정식을 수치계산에 의해 구한 방법과 수조에서 측정된 것을 비교하였다. 수조 실험에 의하면 slack은 어구의 깊이에 따라 다른 것이 관찰되었으므로, slack을 어구의 깊이에 따라 자연수 값으로 증가하는 값을 적용하여 미분방정식의 해를 구해 삼중망의 높이를 구하였다. 그 결과, slack을 일정한 값으로 사용한 경우나 slack을 일정한 값으로 하면서 저면 효과를 고려하여 유속을 감소시켜 적용한 경우보다 오차가 더 작은 것을 확인할 수 있었다.

사 사

수조 사용에 도움주신 백경공업(주)의 박경현 사장님과 임직원님들께 감사드리고, 본 논문을 자세하게 검토하여 주신 심사위원님들과 꼼꼼하게 그림을 다듬어주신 편집위원님께 또한 감사드립니다. 이 연구의 일부는 국립수산물과학원 (동해 심해 수산자원 및 생태계 이용관리 연구, RP-2006-FE-005)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Bessoneau, J.S. and D. Marichal, 1998. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to

- trawls). *Ocean Engineering*, 25, 563 – 583.
- Chang, J.W. and D.O. Sur, 1982. *Fishing gear engineering*. Shinhan, Busan, pp 304.
- Fridman, A.L., 1986. Calculations for fishing gear designs. Revised by J.P.G. Carrothers. *FAO Fishing Manuals*, Fishing News Books Ltd., pp. 241.
- Kim, D.A., 1999. *Fishing Gear Design*. Pyunghwa, Jeonnam, pp 345.
- Kim, S.J., T. Imai and H. Kikukawa, 1991. Analysis on the curvatures of weighted netting in the flow field. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 57(3), 403 – 408.
- Lee, C.W., J.H. Lee and I.J. Kim, 2000. Application of a fuzzy controller to depth control of a midwater trawl net. *Fisheries Science*, 66(5), 858 – 862.
- Lee, C.W., J.H. Lee, B.J. Cha, H.Y. Kim and J.H. Lee, 2005. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation. *Ocean Engineering*, 32, 331 – 347.
- Losanes, L.P., K. Matuda and A. Koike, 1990. Estimation of floating height of trammel and semi – trammel net. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 56, 467 – 472.
- Matuda, K., 1988. Headline height of bottom gillnets set across a water flow. *Fisheries Research*, 6, 167 – 179.
- Matuda, K., 2001. *Fishing gear physics*. Koseisa, Tokyo, pp226.
- Miyazaki, Y., 1964. Basic investigations on the resistance of fishing nets – IV. *J. Tokyo Univ. Fish.*, 50(2), 105 – 110.
- Park, H.H., 1993. A tension measurement method of a towing cable or a buoy cable. *Ocean Engineering*, 20(2), 163 – 170.
- Park, H.H., 2005. An estimating method of the angle of attack of a vertical V – type otter board. *Journal of Korean Society of Fisheries Technology*, 41, 113 – 121.
- Park, H.H., 2006. A method for estimating the gear shape of a mid – water trawl. *Ocean Engineering* (in press).
- Park, K.H., J.H. Lee, B.S. Hyun, Y.H. Ro and J.H. Bae, 2002. Study on the measurements of flow field around cambered otter board using particle image velocimetry. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, 38(1), 43 – 57.
- Stewart, P.A.M., 1988. Measurements of the effects of tidal flow on the headline heights of bottom – set gillnets. *Fisheries Research*, 6, 181 – 189.
- Tauti, M., 1934. The force acting on the plane net in motion through the water. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 3(1), 1 – 4.
- Wan, R., F. Hu and T. Tokai, 2002. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane net. *Fisheries Science*, 68, 815 – 823.

2006년 5월 26일 접수

2006년 7월 27일 수리