

망지의 유체역학적 계수에 관한 연구

송대호 · 이춘우*

부경대학교 수산물리학과, ¹부경대학교 해양생산시스템관리학부

Study on the hydrodynamic coefficients of the nettings

Dae-Ho SONG and Chun-Woo LEE^{1*}

Department of Fisheries Physics, Graduate school, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

¹Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

In this study, the hydrodynamic coefficients were measured using various nettings to analyze the change of drag coefficients and lift coefficients as a basic study for deriving hydrodynamic coefficients. The data on hydrodynamic force obtained from the flume tank tests were used to compare and analyze the hydrodynamic coefficients based on Reynolds number. Standardized hydrodynamic coefficients were then assumed during the analysis procedures. The hydrodynamic coefficients were measured using the 9 kinds of nettings in which had the same total projected area with different diameters and mesh-grouping ratio. These different netting systems : mesh-grouping ratio. The results of the test of nettings were as follows; First, the drag coefficients of nettings increased when the higher attack angles applied, and decreased with the increased flow speed and netting twine diameter. Second, the lift coefficients of nettings showed the increased values until the attack angle 30 degree, but decreased for the attack angle over 40 degree. Third, the hydrodynamic coefficients of netting decreased as the Reynolds number increased, and reach at slightly states in the highest numbers. Fourth, the hydrodynamic coefficients were derived from a functional formula considering attack angles and Reynolds number, and presented in the three dimensional space.

Key words : Drag coefficients, Lift coefficients, Reynolds number

서 론

어구와 양식시설은 망지와 로프가 주된 구성 재료로서 유연 구조물로 간주할 수 있다. 이런

유연 구조물은 외력이 작용하면 모양이 변하고 유체역학적 계수들도 달라지므로 구조물의 거동 계산시 가변적인 계수 적용이 필요하다. 특히

*Corresponding author: cwlee@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5891, Fax: 82-51-629-5885

항력 및 양력계수는 구조물에 작용하는 힘의 크기와 모양을 결정하는 중요한 파라미터이다. 수중에서 어구 거동과 형상을 분석하기 위한 연구는 단순한 모형실험을 시작으로 하여 최근에는 컴퓨터를 기반으로 한 수치해석기법을 이용한 연구 분야로 확대되어 여러 가지 수치계산기법이 제시되고 있다. 이러한 수치계산 방법에는 계산의 효율성을 위해서 수십 또는 수백 개의 그물코를 가상의 수학적 그물코로 근사하는 mesh-grouping 방법이 널리 이용되고 있다.

망지의 유체역학적 계수에 관한 선행 연구로서 Fridman(1986)은 그물발의 직경과 길이의 비가 1대 0.022이고, 성형비가 0.6일때, 입사각에 따른 유체역학적 계수를 제시하였다. Aarsens et al.(1990)은 유연 구조물의 내력과 그 형상 예측 방법을 처음으로 제시하고, 한발의 길이와 직경과의 관계뿐만 아니라 그물에 유체의 입사각을 고려하여 유체력 계수를 제안하였다. Bessonneau and Marichal(1998)은 수중에서 유연한 그물에 작용하는 힘을 조사하기 위하여 강체의 원통형 막대 요소를 사용하여 해석하였으며, Wan et al.(2002)은 수중 어구의 장력과 형상 변화를 시뮬레이션 할 수 있는 비선형 유한요소법을 개발하였다. Lee et al.(2002, 2005, 2008)은 질량스프링 모델을 이용하여 트롤 및 선망, 가두리 등의 운동을 시뮬레이션 하였다. Tsukrov et al.(2003)은 유한요소법을 사용한 계산 방법과 이론적 모델을 제시하고, 과거의 연구와 비교하였으며, 또한 이를 가두리 시스템의 운동 해석에 적용하였다. 이상과 같이 어구와 가두리의 거동 해석에 대한 연구가 여러 학자들에 의해 진행되어 왔으나, 구조물에 작용하는 외력의 계산에 가장 중요한 요소인 유체력 계수에 대해서는 아직 표준화된 계수가 제시되지 않고 있다.

본 연구에서는 표준화된 유체역학적 계수를 얻기 위해서 다양한 망지들의 유체력 계수들을 측정하여 비교·분석하였다. 즉, 그물코의 크기와 발의 굽기는 다르지만 동일한 투영면적을 갖

는 망지를 이용하여 회류수조에서 영각 및 유속에 따른 항력계수와 양력계수를 측정하여, 망지의 성형률 및 mesh-grouping 비율에 따른 망지의 양력 및 항력 계수를 비교·분석하였다. 또한 유체의 흐름을 설명하는데 있어서 중요한 역할을 하는 레이놀즈수를 고려한 유체역학적 계수들을 비교·분석하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 다양한 망지들의 유체역학적 계수를 비교·분석하기 위하여 서로 관련성 있는 9가지 망지를 사용하였다. 실험에 사용된 망지는 그물발의 길이와 직경은 다르지만 기본적으로 동일한 투영면적(Total Projected Area, TPA)을 가지는 Nylon 망지를 사용하였으며, 사용된 망지는 먼저 가로 성형률을 기준으로 60%, 70%, 80%의 망지를 수편 제작하고, 이 망지를 성형률별 기준 망지로 설정하였다. 또한 수백 또는 수천개의 그물코를 가상의 수학적 그물코로 근사하는 mesh-grouping 방법을 사용하여, 기준 망지별 mesh-grouping 비율이 다른 망지를 추가로 제작하였다. mesh-grouping 비율은 기준 망지의 발 길이를 기준으로 각각 3배, 5배가 되도록 6종류를 추가로 제작하여 총 9종류를 사용하였으며, 각 망지의 규격은 Table 1과 같다. 이렇게 제작된 망지는 Fig. 1과 같이 스테인리스 재질의 사각 프레임(600mm×600mm)에 고정하여 실험하였다.

실험은 국립수산물과학원에 설치된 수직순환형 회류수조(관측부 길이: 8.0m, 폭: 2.8m, 수심:

Table 1. Net materials used in the experiment

		(Twine diameter unit: mm)		
Type		A	B	C
Mesh-grouping ratio(times)		1	3	5
Hanging ratio	70%	1.22	3.60	5.90
	60%	1.45	4.35	7.25
	80%	1.45	4.35	7.25
Length of bar(mm)		30	90	150

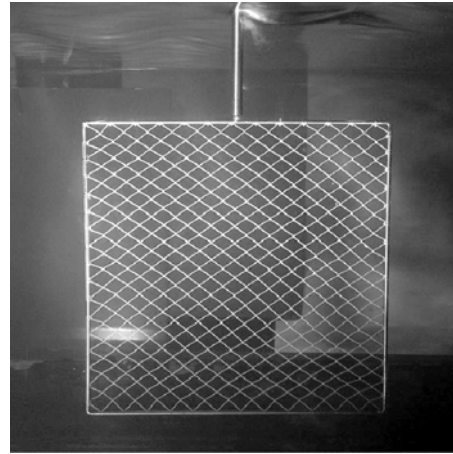
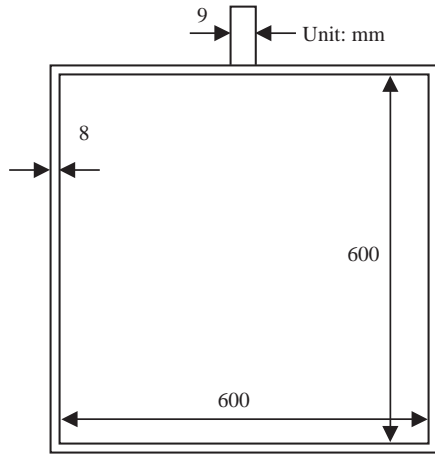


Fig. 1. The schematic view of the frame and mesh-grouping nets.

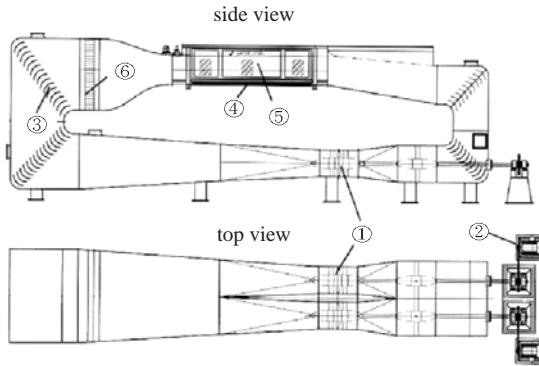


Fig. 2. Schematic drawing of the vertical circulating water channel.

① impeller ② AC motor ③ guide vane ④ under observation panel ⑤ side observation panel ⑥ honeycomb

1.4m)에서 행하였으며, 실험 장치 및 계측 시스템의 구성은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

망지에 걸리는 저항은 물의 흐름에 의해 모형에 작용하는 XY 분력을 측정하는 유분력계(Denshikogyo Co., DL -61025)를 사용하여 측정하였고, 축을 회전시키는 각도 제어기, 실험 유속을 측정하는 프로펠러형 유속계(Kenek Co., VO -101A)를 사용하였다. 또한 유분력계에서 나오는 아날로그 신호는 증폭기(Kenek Co., VO -203A)와 A/D 변환기(NI Co., PCI -6034E)를 통해 컴퓨터에 저장되도록 하였고, Labview(NI, Ver. 8.2)에서 디스플레이 하였다.

본 연구에 사용된 유속은 0.3m/s - 0.8m/s 범위에서 0.1m/s 간격으로 변화시켜 망지에 걸리는 저항을 측정하였고, 또한 각각의 유속에 대하여 0° - 90° 범위에서 10° 간격으로 영각을 변화시키면서 망지에 작용하는 유체력을 측정하였다. 모든 실험의 조건에서 200Hz의 주파수를 20초간 측정하여 그 평균값을 변환하여 사용하였다. 각 방향의 유체력에 대한 변환식은 다음과 같다.

$$F_x = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta \quad (1)$$

$$F_y = f_y \cos \theta - f_x \sin \theta \quad (2)$$

여기서 F_x 와 F_y 는 항력과 양력으로 단위는 kg이

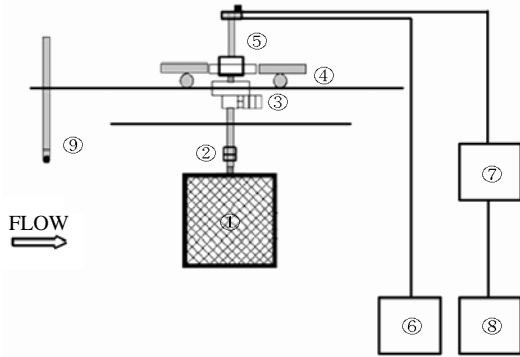


Fig. 3. Experimental set-up for the efficiency model test of the frame.

- ① : frame
- ② : connector
- ③ : angle controller
- ④ : moving traverse
- ⑤ : six component load cell
- ⑥ : angle control box
- ⑦ : signal conditioning
- ⑧ : DAQ device, Labview
- ⑨ : current meter

며, f_x 와 f_y 는 측정된 값으로 단위는 voltage, θ 는 실험 영각이다. 그리고 이 값을 수직성분과 수평성분으로 나누어 항력계수와 양력계수를 도출하였다. 즉, 수중에서 망지에 작용하는 유체역학적 힘은 수직성분인 항력과 수평성분인 양력의 합이다.

$$R = F_x + F_y \quad (3)$$

여기서, F_x 와 F_y 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \quad (4)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_L \rho S V^2 \quad (5)$$

여기서, C_D 와 C_L 은 각각 항력계수와 양력계수이다. 따라서 항력계수와 양력계수는 다음과 같이 도출된다.

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho S V^2} \quad (6)$$

$$C_L = \frac{2F_y}{\rho S V^2} \quad (7)$$

여기서, S 는 망지의 투영면적, ρ 는 물의 밀도이

며, V 는 유속이다. 본 연구에서 측정된 것은 유연체인 망지의 유체력이다. 그러므로 망지의 실험 결과에서는 망지를 부착하지 않은 프레임만의 값을 측정 후, 망지를 부착하여 측정한 결과 값에서 그 값을 배제해 줌으로써 순수 망지만의 값을 도출하였다. 또한 측정된 유체력을 이용하여 레이놀즈수를 고려한 유체역학적 계수를 도출하였다. 레이놀즈수는 유체의 점성력에 대한 관성력의 비를 나타내는 것으로 유체 흐름의 설명에 있어 중요한 역할을 한다. 그 식은 다음과 같다.

$$R_e = \frac{DV}{\nu} \quad (8)$$

$$V = \frac{R_e \nu}{D} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{2F_x D^2}{\rho S R_e^2 \nu^2} \quad (10)$$

$$C_L = \frac{2F_y D^2}{\rho S R_e^2 \nu^2} \quad (11)$$

여기서, D 는 대상 물체의 대표치수로 본 연구에서는 망사의 직경을 나타내며, V 는 유속, ν 는 동점성 계수로서, 본 연구에서는 상온의 물 20°C에서의 값 0.0102cm²/s 을 사용하였다. 식 (6)에서 각 유속별 레이놀즈수를 구하고, 식 (7)과 같이 변형하여 식 (4)와 (5)에 대입하면 식 (8)과 (9)를 통해 유체역학적 계수를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 수조 실험을 통해 측정된 유체력을 식 (8)과 (9)에 대입하여 레이놀즈수를 고려한 항력계수와 양력계수를 도출하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 9가지 종류의 망지를 이용하여 회류수조에서 영각 및 유속에 따른 항력계수와 양력계수를 도출하였다. 그리고 도출한 계수들을 mesh-grouping 비율 및 성형률에 따라 각각 비교·분석하였으며, 측정된 유체력을 바탕으로 레이놀즈수를 고려한 유체역학적 계수를 도출하여 비교·분석하였다.

mesh-grouping 비율에 따른 망지의 유체역학적 계수

본 연구에서 mesh-grouping 비율은 발의 길이를 기준으로 하여 기준 망지에 대하여 각각 3배, 5배인 망지를 이용하였다. Fig. 4는 성형률이 60%인 망지의 mesh-grouping 별 유체역학적 계수를 영각과 유속에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 mesh-grouping 비율에 따라 값의 차이는 있으나 전체적 경향은 유사하게 나타났다. 항력계수의 경우, 기준 망지의 값은 0.12 - 1.27, 3배 망지의 값은 0.11 - 1.18, 5배 망지의 값은 0.11 - 1.04 범위의 값을 나타내었으며, 전반적으로 mesh-grouping 비율이 증가할수록 항력계수의 값은 약간 감소하는 경향을 보였다. 특히 전 망지에서 영각이 0°에서 10° 변화 시 가장 큰 변화를 보였으며, 영각이 증가함에 따라 계수 값 역시 증가하는 경향을 보였다. 또한 유속이 증가할수록 작아지는 경향을 보였다. 반면 양력계수의 경우 영각 30°와 40°를 경계로 증가하다 감소하는 경향을 보였으며, 각 값의 차이는 조금씩 있었으나, 대체적으로 0.01 - 0.23 범위의 값으로 거의 유사한 경향을 보였다.

Fig. 5는 성형률이 70%인 망지의 mesh-grouping 별 유체역학적 계수를 영각과 유속에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 mesh-grouping 비율에 따라 값의 차이는 있으나 전체적 경향은 유사하게 나타났다. 항력계수의 경우, 기준 망지의 값은 0.08 - 1.16, 3배 망지의 값은 0.02 - 1.07, 5배 망지의 값은 0.03 - 1.01 범위의 값을 나타내었으며, 성형률이 60%인 망지와 같이 영각이 0°에서 10° 변화 시 가장 큰 변화를 보였으며, 영각이 커질수록 차츰 증가하는 경향을 보였고, 유속이 증가할수록 작아지는 경향을 보였다.

또한 유속이 증가할수록 작아지는 경향을 보였다. 반면 양력계수의 경우 대부분 영각 40°를 경계로 증가하다 감소하는 경향을 보였으며, 각 값의 차이는 조금씩 있으나, 대체적으로 0.00 -

0.29 범위의 값으로 거의 유사한 경향을 보였다.

Fig. 6은 성형률이 80%인 망지의 mesh-grouping 별 유체역학적 계수를 영각과 유속에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 mesh-grouping 비율에 따라 값의 차이는 있으나 전체적 경향은 유사하게 나타났다. 항력계수의 경우, 기준 망지의 값은 0.05 - 1.35, 3배 망지의 값은 0.08 - 1.23, 5배 망지의 값은 0.01 - 0.81 범위의 값을 나타내었으며, 성형률이 60%와 70%의 망지와 같이 영각이 0°에서 10° 변화 시 가장 큰 변화를 보였다.

또한 영각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 유속이 증가할수록 작아지는 경향을 보였고, mesh-grouping 비율이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 다른 성형률의 망지에 비해 발 길이가 5배인 망지의 값이 상대적으로 적게 나타났으며, 영각이 증가할수록 그 비율에 따른 값의 차이는 커지는 경향을 보였다. 반면 양력계수의 경우 대부분 영각 40°를 경계로 증가하다 감소하는 경향을 보였으며, mesh-grouping 비율이 증가함에 따라 값은 감소하는 경향을 보였다. 또한 성형률 60%와 70% 망지에 비해 비교적 큰 값을 보였으며, 전체적으로 0.00 - 0.37 범위의 값을 보였다.

전반적으로 mesh-grouping 비율과 성형률이 다른 3종류의 망지에 대한 유체력 계수를 비교해 보면, 항력계수는 영각의 영향을 가장 크게 받아서 영각이 증가될수록 항력계수도 증가하였다. 같은 영각에서는 망사의 굵기가 굵어질수록, 유속이 빨라질수록 유체력 계수가 감소하였다. 다시 말해 항력계수는 유속의 제공에 반비례하며, 유속과 레이놀즈수의 일반적인 관계 특성 즉, 레이놀즈수가 증가함에 따라 항력계수가 줄어드는 현상과 동일하므로 항력계수의 값은 감소하는 것이다. 또한 이것은 레이놀즈수에 의한 유체력 계수의 표준화가 가능함을 의미한다. 양력계수는 영각 30°까지는 영각의 증가에 따라 커졌으며, 40° 이후부터 감소하였다. 성형률

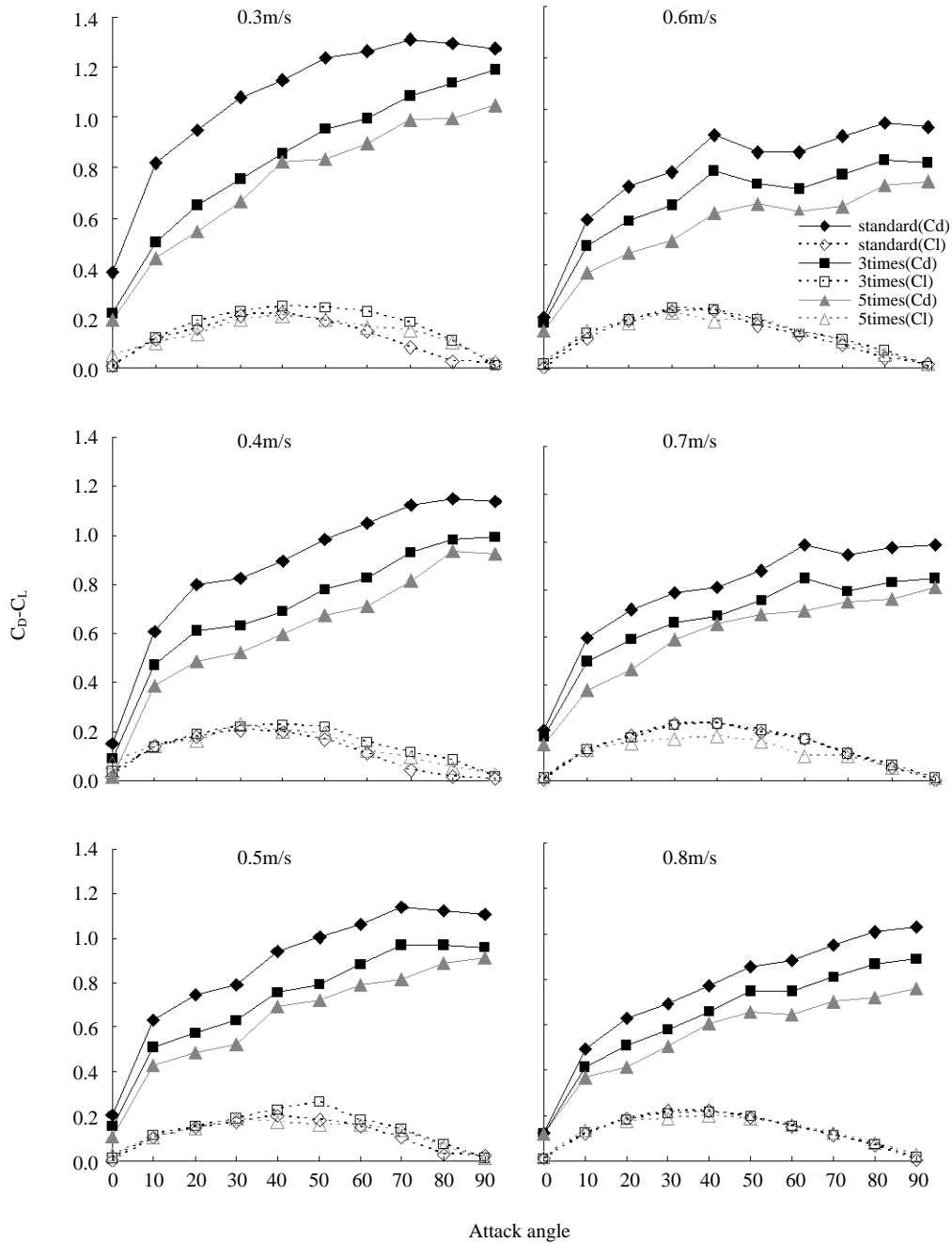


Fig. 4. Hydrodynamic coefficients by mesh-grouping ratio(Hanging ratio 60%).

60%와 70% 망지의 경우 양력계수의 값에는 큰 차이가 없으나, 성형률 80%인 망지의 경우 전반적으로 크게 나타났다. 이는 성형률이 증가할수

록 그물 밧에 대한 유체의 입사각이 줄어들게 되므로 양력의 영향을 더 많이 받기 때문으로 판단된다.

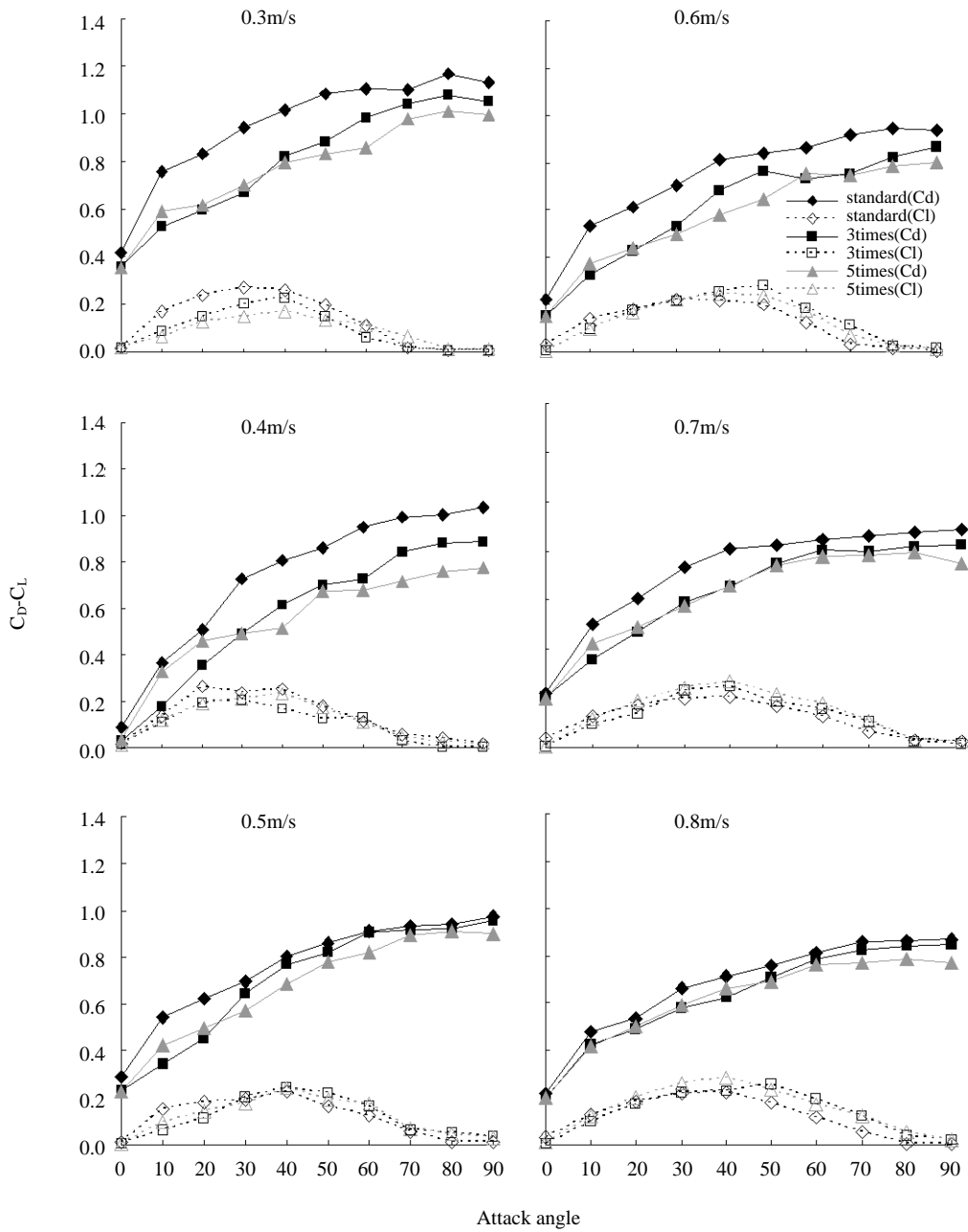


Fig. 5. Hydrodynamic coefficients by mesh-grouping ratio(Hanging ratio 70%).

레이놀즈수를 고려한 유체역학적 계수

여기서는 레이놀즈수를 고려하여 mesh-grouping 비율 및 성형률에 따른 유체역학적 계수들을 분석하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각의 성

형률별 망지들의 레이놀즈수에 따른 유체역학적 계수를 영각별로 나타내고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 레이놀즈수가 증가할수록 망지별 영각에 따른 항력계수는 감소하는 경향을 보

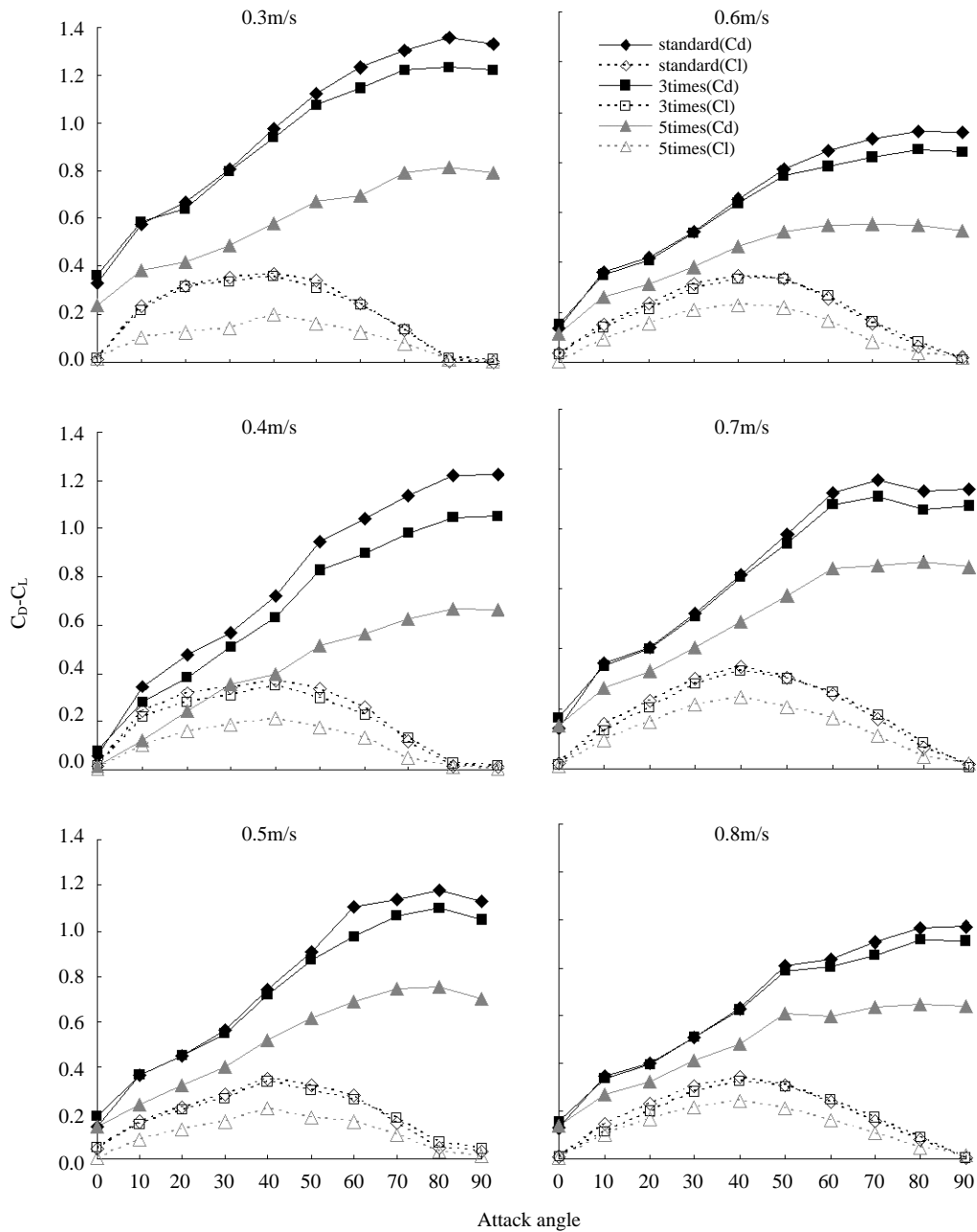


Fig. 6. Hydrodynamic coefficients by mesh-grouping ratio(Hanging ratio 80%).

였고, 동일한 레이놀즈수에서는 영각이 증가할수록 항력계수 값은 증가하였다. 또한 성형률에 따른 유체력 계수 차이는 크지 않았으나, 이것은 본 실험에서 조사된 성형률의 범위가 60% -

80%로 비교적 좁은 범위에서 실험되었기 때문으로 판단된다. 향후 보다 넓은 범위의 성형률에 대한 실험이 필요하다. 또한 공극률과 여과율을 고려한 실험이 수반되어 레이놀즈수에 따른 양

력 및 항력계수가 정의된다면 보다 정확한 값을 산출할 수 있을 것이다.

Fig. 8에는 레이놀즈수를 고려한 양력계수를 나타내었다. 양력계수는 레이놀즈수에 따른 변화 경향이 뚜렷이 나타나지 않았고, 영각에 따른 영향이 가장 크게 나타났다. 또한 성형률에 따른 변화도 뚜렷하지 않았다.

영각과 레이놀즈수를 고려한 유체역학적 계수

본 연구를 통해 망지의 유체력 계수에 영향을 미치는 요소는 유체의 흐름을 설명하는데 중요

한 역할을 하는 레이놀즈수와 영각임을 알 수 있었으며, 3차원 그림으로 나타내면 Fig. 9, 10, 11과 같다. 본 연구에서 조사된 범위는 유속 0.8m/s 이하에서 일반적으로 사용되는 망지에 대한 실험이므로 정치망, 가두리, 선망 및 자망과 같이 비교적 작은 속도로 움직이는 망지에 대해서는 정확한 유체력 계산 값을 제공해 줄 수 있다. 그러나 중층 트롤과 같이 4knots 이상에서 예상하는 어구의 유체력 계산에서는 유체력이 과대하게 계산될 소지가 있다. 향후 본 연구에서 사용된 망지 이외에 좀 더 다양한 재질의 망지 뿐 아

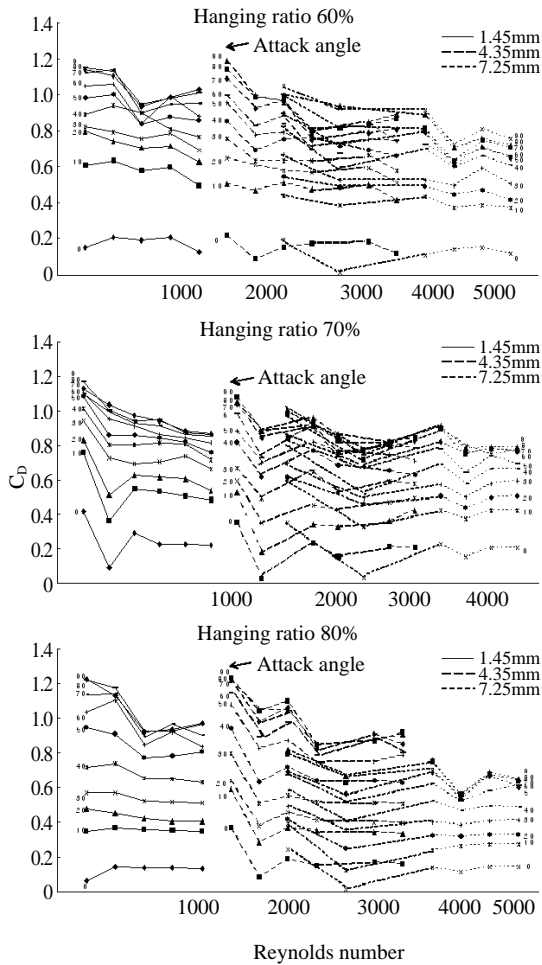


Fig. 7. The drag coefficient for the nettings by Reynolds numbers.

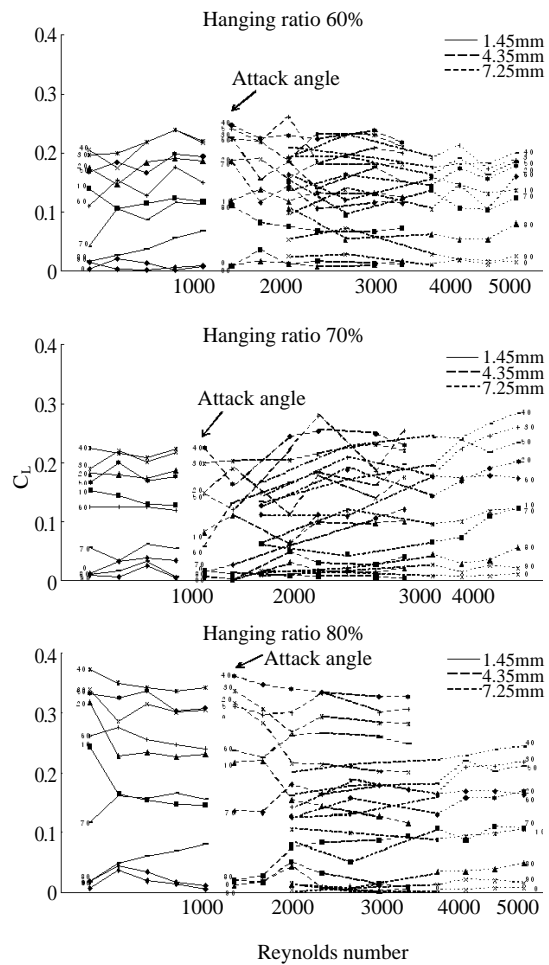


Fig. 8. The lift coefficient for the nettings by Reynolds numbers.

니라 로프에 대해서도 보다 넓은 범위의 레이놀즈수에 대한 실험이 수행되어 유체역학적 계수들에 대한 정확한 분석이 이루어지게 되면, 고속으로 운동하는 어구의 거동과 형상을 보다 정확하게 계산할 수 있을 것이다.

결론

본 연구는 유체역학적 계수를 얻기 위한 기초적인 연구로서 다양한 망지의 유체역학적 계수들을 측정함과 동시에 실험을 통해 측정된 유체

력을 이용하여 레이놀즈수를 고려한 저항계수들을 비교·분석함으로써 보다 표준화된 유체역학적 계수 추정을 시도하였다. 실험에 사용된 망지들은 그물밭의 길이와 직경은 다르지만 동일한 투영면적을 가지면서 성형률에 따른 mesh - grouping 비율이 다른 9가지 종류의 망지를 수평 제작하여 회류수조에서 영각 및 유속에 따른 유체역학적 계수들을 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 망지의 항력계수는 영각이 증가함에 따라 증가하였고, 유속과 망사의 직경이 커질수

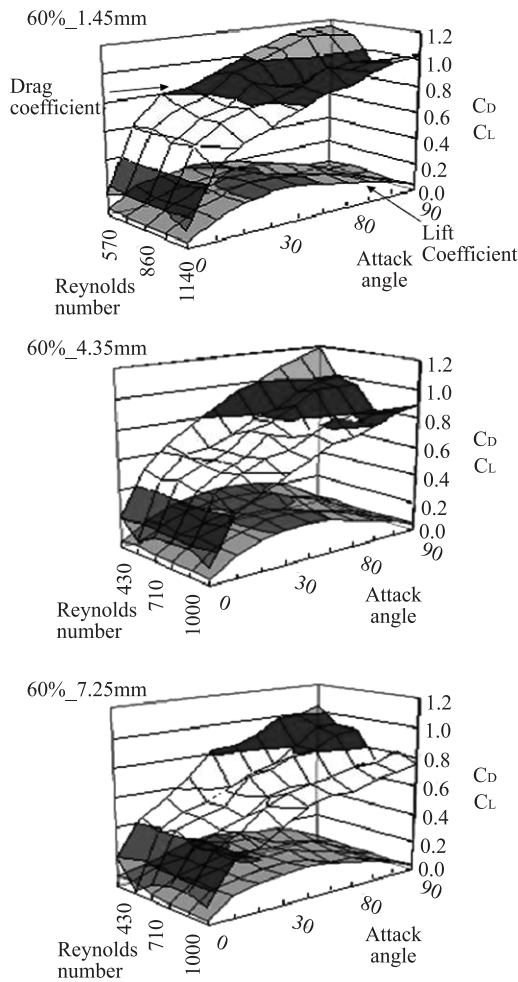


Fig. 9. The 3D chart of hydrodynamic coefficients by Reynolds number and attack angle(Hanging ratio 60%).

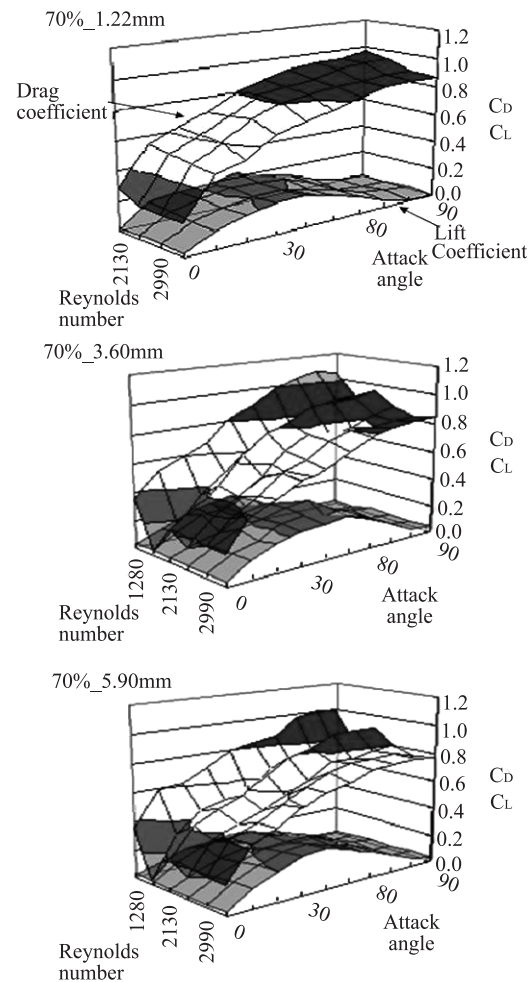


Fig. 10. The 3D chart of hydrodynamic coefficients by Reynolds number and attack angle(Hanging ratio 70%).

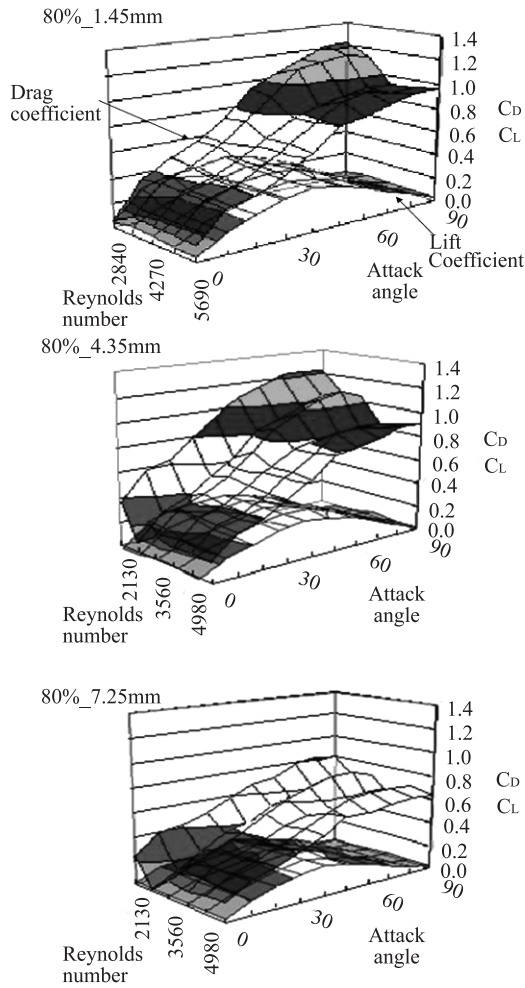


Fig. 11. The 3D chart of hydrodynamic coefficients by Reynolds number and attack angle(Hanging ratio 80%).

록 감소하였다. 망지의 양력 계수는 영각 30°까지는 영각의 증가에 따라 커졌고, 영각 40°를 넘어서면서 감소하였다. 망지의 저항계수는 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소하면서 비교적 일정한 값을 나타내었다. 결국 망지의 저항계수는 영각과 레이놀즈수의 함수로 나타낼 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R-012006000110250) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

Aarsnes, J.V., H. Rudi and G. Loland, 1990. Current forces on cage, net deflection. In: Engineering for Offshore Fish Farming. Thomas Telford, London, 137 – 152.

Bessonneau, J.S. and D. Marichal, 1998. Study of the dynamics of submerged supple nets(application to trawls). Ocean Engineering, 25(1), 563 – 583.

Cha, B.J., and C.W. Lee, 2002. Dynamic simulation of a midwater trawl system's behavior. Fisheries science, 68, 1865 – 1868.

Fridman, 1986. Calculation for fishing gear designs. FAO Fishing Manuals, 185 – 212.

Igor, T., E. Oleg, F. David, M.R. Swift and C. Barbaros, 2003. Finite element modeling of net panels using a consistent net element. Ocean Engineering, 30, 251 – 270.

Imai, T., 1979. Basic studies on the plane net set into the flowing water – IV: Comparative study of hydrodynamical resistance on knotted and knotless nettings. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ., 1276 – 1282.

Lee, C.W., 2002. Dynamic analysis and control technology in a fishing gear system. Fisheries science, 68, 1835 – 1840.

Lee, C.W., J.H. Lee, B.J. Cha and H.Y. Kim, 2005. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation. Ocean Engineering, 32, 331 – 347.

Lee, C.W., Y.B. Kim, G.H. Lee, M.Y. Choe., M.K. Lee and K.Y. Koo, 2008. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. Ocean Engineering, 35, 1521 – 1532.

Miyazaki, Y., 1964. Basic investigations on the resistance of fishing nets –(V): The resistance of ropes placed obliquely to the stream. Journal of the Tokyo University of Fisheries, 50(2), 111 – 123.

Tauti, M., 1934. The force acting on the plane net in motion through the water. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 3(1), 1 – 14.

- Tauti, M., 1934. A relation between experiments on model and on full scale of fishing net. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 3(4), 171 – 77.
- Tsukrov, I, O. Eroshkin, D. Fredriksson, S.M. Robinson and B. Celikkol, 2003. Finite element modeling of net panels using a consistent net element. Ocean Engineering, 30, 251 – 270
- Wan, R., F.X. Hu and T.A. Tokai, 2002. Static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets. Fisheries science, 68, 815 – 823.
-
- 2009년 1월 9일 접수
2009년 2월 6일 1차 수정
2009년 2월 9일 수리