

중층 트롤 어구 시스템 운동의 유체역학적 시뮬레이션

차봉진 · 이춘우 · 이주희 · 김현영

부경대학교
(2002년 5월 3일)

Hydrodynamic Simulation of Midwater Trawl System Behavior

Bong-Jin CHA, Chun-Woo LEE, Ju-Hee LEE and Hyun-Young KIM

Pukyong National University
(Received May 3, 2002)

Abstract

In this study, a mass-spring model is used to dynamically describe and calculate the shape and movement of a mid-water trawl system. This mathematical model theorizes that the factors constituting the system are the material points and the external forces such as hydrodynamic load, gravity, and buoyancy act on these material points. In addition, it surmises that these material points are connected to each other by springs, the springs do not have any mass, and the internal force acts on these springs. The non-linear differential equations are implicitly integrated with time for guaranteeing a stable solution.

The dynamic simulation by the mass-spring model shows the status of the gear such as fishing gear depth, distance between doors, shape of the gear, and tension of each line. It depends on the parameters such as towing force, warp length, force of a sinker, buoyancy of a float, type of door and netting materials. The validity of the model is verified by comparing simulation motions of a trawl system obtained from computed values to those from an actual experiment.

서 론

중층 트롤 어구의 형상과 움직임은 어구를 구성하는 부속구의 물리적인 특성, 어구의 구조, 예망 속력 및 끌줄 길이 등에 따라 달라지며, 이러한 동적인 변화는 어획량에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 어구의 구조와 어구 조작 방법에 따라 어구의 형상과 거동을 예측할 수 있다면 성능이 우수한 어구를 개발할 수 있으며, 어구를 운용하는데 있어서도 중요한 정보를 얻을 수 있다.

중층 트롤 시스템은 강체와 유연 구조물이 서로

연결된 구조로서 어구의 모양이 외력에 의해 쉽게 바뀌는 비선형적인 시스템이다. 이러한 중층 트롤 시스템에 대해서 어구의 형상과 수중 움직임을 해석하기 위해 해상에서 실물어구를 이용하여 실험하거나, 운동모델을 이용한 이론적인 연구들이 많이 수행되어 왔고, 이러한 연구들의 결과로 운동방정식들도 제시되고 있다. 최근에 수행된 연구로서는 해상에서의 실험으로 어구 운동을 계측한 Kim and Lee¹⁾, Lee *et al.*²⁾ 과 Teshima *et al.*³⁾의 연구 등이 있고, 중층 트롤 시스템을 어선, 전개판, 그물로 단순화하여 운동방정식을 도출하

* 본 연구는 한국과학재단 목적기론연구(R01-1999-00183)지원으로 수행되었음.

여 이론적으로 해석한 Lee and Lee⁴⁾, Hu *et al.*⁵⁾의 연구가 있으며, 중층 트롤 그물을 여러 요소로 분할하여 보다 상세한 모델로 시뮬레이션 한 Bessonneau and Marichal⁶⁾, Niedzwiedz⁷⁾, Leitzke and Niedzwiedz⁸⁾의 연구 등이 있다. 또한 이러한 연구의 결과들을 토대로 어구 설계 및 시뮬레이션 도구들도 개발되어 상용화되고 있다.

특히 어구시스템의 거동을 이론 모델의 수치해석을 통하여 알아내고 어구설계에도 활용하고자 하는 연구가 최근에 많이 수행되고 있다. 그러나 어구의 시뮬레이션은 실물어구의 형상과 움직임을 정확히 예측하는데 목적이 있으므로 이론 모델을 도출하는 단계에서 이론모델을 수치해석하여 얻어지는 결과와 실물어구에서 얻어지는 결과를 비교하여 모델의 타당성을 검증해야 한다. 또한 시뮬레이션 도구로 어구를 설계하거나 어구조작을 위한 정보를 획득하는데 이용하기 위해서는 예망 중 끝줄의 길이 및 예망속력의 변화에 따른 어구의 형상과 움직임 등도 예측이 가능해야 한다. 그러나 최근의 중층 트롤 시스템을 시뮬레이션한 연구들 중에서 시뮬레이션한 어구와 물리적 조건이 같은 어구를 실제 해상에서 실험해 보고, 실험을 통해 얻은 어구의 움직임과 형상을 시뮬레이션에서 얻은 형상과 정량적으로 비교 분석한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 어구시스템 해석에 적합한 수학

모델을 이용하여 실물어구에 대한 이론 모델을 기술하고 유체 역학적인 고려와 수치계산을 통하여 어구의 거동을 시뮬레이션하였고, 시뮬레이션 결과를 실험실에서 얻어진 결과와 비교하여 이론모델의 정확도를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 어구시스템의 수식화

중층트롤어구는 3차원공간에서 운동한다. 본 연구에서는 중층트롤어구를 X, Y, Z 축에 대해 Fig. 1과 같이 정의하였다. 즉, X, Y 평면은 해수면과 평행인 면이고, Z 축은 어구의 수심을 나타낸다.

본 연구에서 중층 트롤의 움직임을 시뮬레이션하기 위해 사용된 모델은 질량 스프링(Mass-Spring)모델이다^{9,10)}. 본 모델은 질량을 가진 질점들이 질량이 없는 스프링으로 연결된 구조로 되어 있다고 가정하여 시스템을 기술한다. 이 모델을 중층 트롤 시스템에 적용시키기 위해서는 어선, 전개판 및 각종 속구들을 질점으로 하고, 실제 그물에 존재하는 물리적인 그물코들도 수학모델의 질점으로 근사시켜 표현한다. 본 모델은 아래의 식으로 표현될 수 있다.

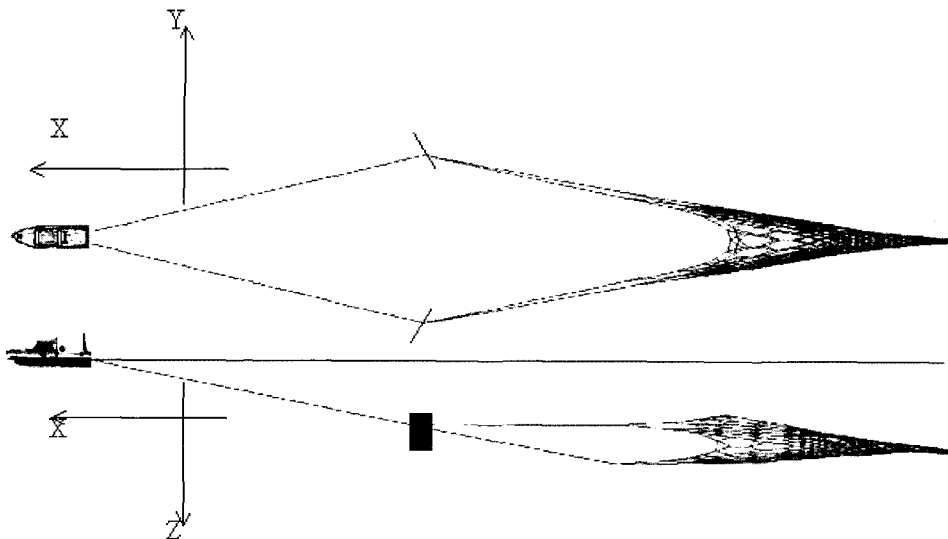


Fig. 1. The coordinate system for a midwater trawl system.

$$m_i \ddot{q}_i = f_i \dots\dots\dots(1)$$

여기서 m 과 \ddot{q} 는 각각 질점 i 의 질량과 가속도이며, f_i 는 질점에 작용하는 힘이다. 질점에 작용하는 힘은 내력과 외력이 있다.

질점 간에 작용하는 내력은 어구 시스템 구성에 사용된 각종 줄과 그물살의 탄성에 의한 힘으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_i^{int} = - \sum k_i \frac{r_i}{\|r_i\|} (\|r_i\| - l_i^0) \dots\dots\dots(2)$$

여기서 k_i 는 줄의 탄성계수이며, r_i 는 질점 i 의 위치벡터, $\|r_i\|$ 은 위치벡터의 크기, l_i^0 는 질점간의 원래 길이 등이다.

질점에 작용하는 외력은 중력, 저항, 양력 및 부력을 들 수 있다. 질점의 수중 무게에 해당되는 중력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_i^{gr} = m_i g \dots\dots\dots(3)$$

여기서 g 는 중력가속도이다.

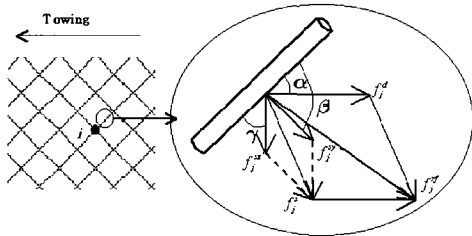


Fig. 2. The drag force and lift force of a bar with the flow.

질점에 작용하는 저항은 질점에 작용하는 항력과 양력 벡터에 의해 결정된다. 항력과 양력은 매 계산 스텝마다 그물발들에 작용하는 유체력의 크기와 방향의 합력에 의해서 결정된다. Fig. 2는 입의 매듭(i)와 매듭에 연결된 j 번째의 그물 한 발에 작용하는 항력과 저항을 나타낸 것이다. 이때 그물 한발의 X, Y 및 Z 에 대한 기울기가 각각 α, β, γ 이며, X 축과 평행한 방향으로 예망되어 간다면, α, β, γ 는 방향여현을 통해 계산할 수 있고 항력계수(Cd_j)와 양력계수(Cl_j)는 흐름에 대

한 그물발의 기울기인 각 α 에 의해서 결정된다. 하지만 양력의 경우는 Y 및 Z 축으로 작용하는 힘의 합력으로 결정된다. 이 때 그물발 j 에 미치는 항력인 f_j^d 와 Y 축의 양력 f_j^y 및 Z 축의 양력 f_j^z 는 각각 식(4) 과 식(5) 및 식(6)과 같다.

$$f_j^d = \sum \frac{1}{2} Cd_j \rho L_j v_i^2 \dots\dots\dots(4)$$

$$f_j^y = \sum \frac{1}{2} Cl_j \rho L_j v_i^2 \cos \beta \dots\dots\dots(5)$$

$$f_j^z = \sum \frac{1}{2} Cl_j \rho L_j v_i^2 \cos r \dots\dots\dots(6)$$

위의 식에서 ρ 는 해수밀도 v_i 는 질점의 속도, 그리고 L_j 는 j 그물발의 투영면적이다.

이들 항력과 양력에 의해 그물발이 받는 합력은 다음과 같다.

$$f_j^f = f_j^d + f_j^y + f_j^z \dots\dots\dots(7)$$

2. 수치계산 방법

어구시스템의 계산에서는 어구를 가능한 많은 질점으로 분할하여 계산할수록 그물의 세밀한 모양까지 시뮬레이션할 수 있다. 그러나 본 시뮬레이션의 모델이 되는 가야호 그물에 존재하는 그물코는 약 17만개 가량으로 현재 사용되는 PC의 성능을 고려할 경우 물리적으로 존재하는 모든 그물코를 질점으로 지정하여 계산하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 이들 그물코를 약 1000개의 질점으로 근사하여 계산하였다.

질점의 배치방법으로서의 그물의 대형 망목 부분은 실제로 존재하는 그물코는 전부 질점으로 취하고, 나머지 그물망지로 구성되어 있는 부분은 몇 개에서 수백개의 그물코를 하나의 그물코로 근사하여 이론모델을 구성하였다. 대형 망목 부분의 질점 면적은 그 질점의 매듭의 면적과 질점과 연결된 발들의 총 투영면적(TSA)의 반의 합으로 하였고, 그물망지 부분의 대표질점 부분은 질점들이 포함된 망지의 총 TSA를 질점수로 나누어 각 대표질점의 면적으로 취하였다.

수치해석방법으로는 Newmark- β 의 방법 중 일반적으로 안정되고 빠른 계산시간을 보장하는 것으로 알려진 사다리꼴방법($\alpha=0, \beta=0.25, \gamma=0.5$)을 사용하였다¹¹⁾.

3. 해상실험

시뮬레이션의 결과와 비교하기 위해서 실물 중층 트롤 어구를 이용한 해상실험을 실시하였다. 사용된 해상실험은 1997년 8월 28일부터 1997년 8월 30일까지 동해상(36° 05'N, 130° 25'E~36° 20'N, 130° 47'E)에서 부경대 실습선 가야호를 이용하여 실시하였다.

가야호 중층 트롤 시스템의 주요 제원은 전개판은 크기가 3m×2m, 수중무게는 1500kg이며, 발줄의 수중무게는 200kg, 그물은 망사의 투영면적이 160m², 뽀킨 길이 약 150m이다. 어구에 부착되어 있는 뜸의 전체 부력은 630kg이며, 침자의 수중무게는 650kg인 것을 2개 사용하였다. 특히 그물에 관해서는 투영면적을 정확히 적용하기 위해 망지를 구성하는 각 매듭의 크기도 고려하였다. Fig. 3은 해상실험에서 사용된 어구의 설계도이다.

트롤의 예망 중의 어구 형상을 해석하기 위한 자료로서 예망 속도, 끌줄의 길이 및 장력, 전개

판의 수심 및 전개판 사이의 간격, 그물의 예망 수층과 망고 등을 계측하였다. 예망 속도와 끌줄의 길이 및 장력은 컴퓨터를 이용한 계측 시스템을 구성하여, 예망 속도는 도플러로그로부터 출력되는 아날로그량을 A/D변환하여 얻고, 끌줄의 길이 및 장력은 트롤 윈치(RAPP HYDEMA A/S)를 제어하는 제어기(Programmable Controller)에서 RS-232C를 통하여 컴퓨터에 입력되도록 하였다.

전개판의 수심과 간격, 그물의 예망 수층과 망고는 가야호에 설치된 ITI(Integrated Trawl Instrumentation)와 미니로그(Minilog)를 이용하여 계측하였다.

전개판에는 각각 1개씩의 ITI Sensor가 부착되어, 전개판 간격이 컴퓨터를 통해서 30초 마다 샘플링 되도록 하였다. 그리고 4개의 미니로그를 사용하여 좌우 전개판에 각각 1개씩, 그물의 뜸줄 중앙부와 발줄 중앙부에 각각 1개씩을 부착하여 전개판의 수심과 그물의 수심 및 망고를 계측하였다.

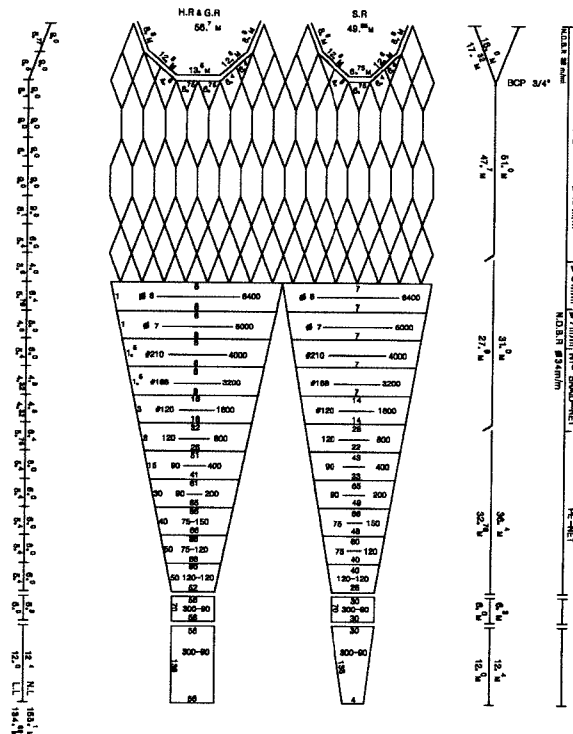


Fig. 3. The drawing of the Midwater trawl net.

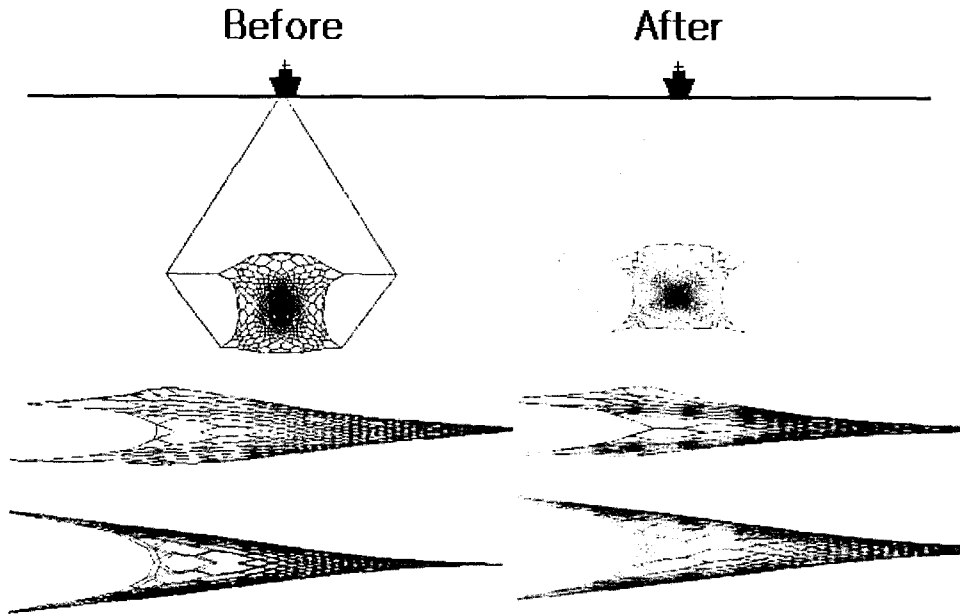


Fig. 4. Simulated gear shape when the towing speed was changed from $2m/s$ to $2.5m/s$.

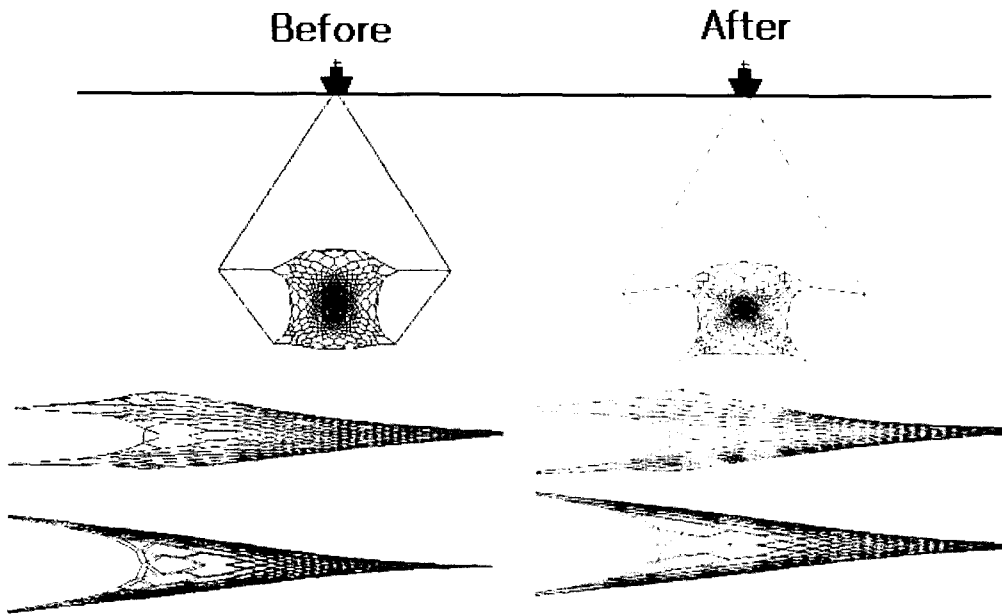


Fig. 5. Simulated gear shape of the simulation when warp length was changed from $250m$ to $300m$.

결과 및 고찰

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 예망속도를 증가시킨 경우와 끌줄의 길이를 증가시킨 경우 이론모델을 수치 계산하여 얻은 형상 변화를 나타낸다. 이 때 예망속도를 증가시킨 경우는 그물이 수면으로 부상하면서 전개판 사이의 전개간격이 커진 것을 알 수 있으며, 끌줄 길이를 증가시킨 경우는 어구의 수심이 깊어지면서 전개판 사이의 간격도 약간 커진 것을 볼 수 있다.

Table 1. Comparison the results from the simulation with the 2m/s towing speed and the 250m warp length and those from the experiment at sea

	(unit : m)	
	Simulation	Field Test
Depth of Doors	75	70
Distance of Doors	82	81
Width of Net Mouth	27	27
Height of Net Mouth	41	37

Table 1은 예망속도가 2m/s일 때의 시뮬레이션 결과를 해상실험의 결과와 비교한 것으로 전개판 사이의 간격과 망폭은 계산치와 실험치가 거의 일치하며, 전개판의 수심과 망고는 각각 5m와 4m의 오차를 가지고 있었다. 이러한 결과는 해상실험의 실험 오차를 감안하면 해상실험의 결과와 시뮬레이션의 결과가 대단히 유사하다는 것을 의미한다.

Table 2. The results of the simulation in accordance with the changes in the warp length with the 2m/s towing speed

(unit : m)				
Warp Length	Depth of Doors	Distance of Doors	Width of Net Mouth	Height of Net Mouth
250	75	82	27	41
300	83	86	29	40
350	97	92	33	40

Table 2는 예망속도를 2m/s로 일정하게 하고 끌줄길이를 250m에서 50m씩 증가시켰을 때의 어

구거동을 계산한 결과이다. 끌줄의 길이가 증가될수록 어구의 예망수심이 깊어졌고, 전개판 간격과 그물의 망폭은 약간 커졌으나 망고는 큰 변화가 없었다.

Table 3. The results of the simulation in accordance with the changes in the towing speed

(unit : m)				
Towing Speed (m/s)	Depth of Doors	Distance of Doors	Width of Net Mouth	Height of Net Mouth
2	75	82	27	41
2.5	56	85	31	37
3	42	94	34	31

Table 3은 끌줄길이를 250m로 고정하고 예망속도를 0.5m/s씩 증가시켰을 때의 어구거동을 계산한 결과이다. 예망속력이 증가할수록 어구가 수면으로 부상하였으며, 전개판 사이의 간격과 망폭은 약간씩 증가하고 망고는 작아졌다.

Table 4. The results of the simulation in accordance with the changes in the total buoyancy with the 2m/s towing speed

(unit : m)				
Total Buoyancy (N)	Depth of Doors	Distance of Doors	Width of Net Mouth	Height of Net Mouth
6300	75	82	27	41
7200	69	79	25	45
8100	65	75	23	48

Table 4는 어구의 뜰줄에 부력을 900N씩 증가시키면서 어구의 거동을 계산한 결과이다. 이 때 어구는 수면으로 부상하였으며, 전개판 사이의 간격과 망폭이 줄어들었고, 망고는 증가하였다.

Table 5는 전개판의 전개력을 증가시키기 위해 전개판의 면적을 6m²에서 1m²씩 증가시키면서 어구의 거동을 계산한 결과이다. 이 때 전개판의 면적이 증가하면 전개력이 증가하여 전개판 사이의 간격이 커지고, 망폭이 증가하며, 망고는 줄어들었고, 어구는 부상하였다.

Table 5. The results of the simulation in accordance with the changes in the area of door with the 2m/s towing speed (unit : m)

Area of Door (m^2)	Depth of Doors	Distance of Doors	Width of Net Mouth	Height of Net Mouth
6	75	82	27	41
7	69	90	33	40
8	65	100	37	38

해상실험에서는 해상상태의 변동과 수중 계측의 한계로 인하여 모든 실험 상태에 대한 체계적인 자료를 구할 수 없었으나, 부분적으로 얻어진 자료를 시뮬레이션의 결과와 비교하면 전체적으로 이론 모델이 실물어구의 형상과 운동을 잘 반영하는 것으로 판단되었다.

특히 본 연구에서는 그물 각 부위의 매듭들의 면적을 고려하여 실제의 면적과 같도록 하였으며, 그물에 작용하는 항력 및 양력 계수 또한 실제 예망 시와 같이 그물의 각 부위가 흐름과 이루는 각에 의해 매 계산 단계마다 자기 다르게 결정되도록 하여 그물의 각 부분에 대한 현실적인 시뮬레이션이 가능하였다.

본 연구의 결과로부터 이론 모델에 의한 시뮬레이션을 활용하면 그물 설계 시 어구 구조와 부속구들의 배치에 따른 어구의 형상에 대해 알 수 있어 성능이 우수한 어구를 설계할 수 있으며, 자신이 운용하는 어구의 거동에 대한 특징을 손쉽게 파악할 수 있어 조업 시 큰 도움을 줄 수 있다. 특히 어구 설계시 그물의 각 부위에서 발생하는 저항과 형상을 파악할 수 있어 과부하에 따른 파망을 예방할 수 있으며, 보다 개선된 어구를 제작하는데 도움이 된다.

정확한 시뮬레이션은 어구 각 부위의 정확한 정보를 기본으로 하며, 질점이 많아질수록 좀더 정확하고 세밀한 시뮬레이션이 가능하다. 즉 하나의 중층 트롤 어구 시스템을 시뮬레이션하기 위해서는 1000개 이상의 질점의 정보가 필요로 하며, 하나의 질점은 20개 이상의 물리적 정보를 동반한다. 따라서 현재와 같이 어구를 구성하는 각 부위의 질점들의 정보를 인간의 손으로 직접 기술한다면 많은 시간이 소요되며 계산 시 오류를 발생시키는 결정적인 원인이 되기도 한다. 그러므로 질점에 대한 원활하고 정확한 정보 획득을 위해

서는 어구 설계도에서 자동으로 어구의 각 부위를 질점으로 알맞게 분할하고 어구에 따른 질점의 정보들을 얻어내어 시뮬레이션 계산에 이용할 수 있는 방법이 있어야 한다. 따라서 시뮬레이션 연구는 어구 설계도에서 정보를 자동으로 획득할 수 있는 방법의 개발과 함께 진행되어야 하며, 이러한 방법의 개발은 어구를 자동으로 설계하는 방법과도 큰 연관이 있다.

요 약

본 연구에서는 중층 트롤 어구 시스템의 운동을 예측하기 위한 운동방정식을 정의하였고 중층 트롤 어구 시스템의 운동을 유체역학적으로 해석하여 시뮬레이션에 적용하여 계산한 결과를 해상에서 실험한 결과들과 비교하여 시뮬레이션의 정확도를 검증하였다.

해상실험은 1997년 8월 28일부터 1997년 8월 30일까지 동해상(36° 05'N, 130° 25'E ~ 36° 20'N, 130° 47'E)에서 부정대 실습선 가야호를 이용하여 실시하였다.

그 결과는 다음과 같다.

1. 중층 트롤 시스템의 운동을 해석하기 위해 사용된 운동 방정식은 $m_i \ddot{q}_i = f_i$ 으로 기술하였고, 여기서 m 과 \ddot{q} 는 각각 질점 i 의 질량과 가속도이며, f_i 는 질점에 작용하는 힘이다.

2. 각 질점에 작용하는 힘은 내력과 외력으로 구성되며, 내력은 질점 사이에서 작용하는 힘으로 어구 시스템 구성에 사용된 각 중 줄과 그물실의 탄성에 의한 힘이며, 외력은 질점에 작용하는 저항, 부력 그리고 중력 등이다.

3. 시뮬레이션의 결과를 해상실험의 결과와 정량적으로 비교하기 위해 끌줄길이 250m, 예망속력 2m/s에서의 전개판 간격, 전개판 수심, 망고 그리고 망폭을 비교하였다. 이 때 전개판 사이의 간격과 망폭은 계산치와 실험치가 거의 일치하며, 전개판의 수심과 망고는 각각 5m와 4m의 오차를 가지고 있었다.

4. 시뮬레이션 도중 끌줄의 길이, 예망속력, 부력 그리고 전개판 면적을 증가시키면서 어구의 형상을 계산한 결과를 앞선 해상 실험들의 결과

와 비교하였다. 이 때 끌줄길이를 증가시킨 경우 어구의 예망수심이 깊어졌으며 전개판의 간격이 증가하였다. 예망속력을 증가시킨 경우 어구가 수면으로 부상하였으며 전개판의 간격이 줄어들었다. 부력을 증가시킨 경우에도 어구가 수면으로 부상하였으며 전개판의 간격과 망폭이 줄어들었다. 마지막으로 전개판의 면적을 증가시킨 경우에는 전개판의 전개력이 증가하여 전개판 사이 간격이 커지고 망폭이 증가하였다.

참고문헌

1. Kim, I. J. and Lee, C. W.(1999) : Analysis of the Net Mouth Shape for a Midwater Trawl Gear. Bull. Korean Fish. Soc. Technol, 35(2), 118~128(in Korean).
2. Lee, C. W., Jang, C. S., Kim, M. S., Shin, H. O. and Kim, I. J.(1998) : Measurements of idwater trawl system and dynamic characteristics, Bull. Korean Fish. Soc. Technol. 4(3), 94~301(in Korean).
3. Teshima, K., Fujishi A., Kubota, K., Inoue, S., Nagamatsu, K., Abe, O., Tsukiyama, K.k and Takeshita, K.(1993) : Towing erformance of an Improved Yoko-2 Midwater Trawl Desinged for Research Purposes, Bull. of Seikai National Fisheries Research Institute. 71.
4. Lee, C. W. and Lee, J. H.(2000) : Modeling of a midwater trawl system with respect to the vertical movements, Fisheries Science. 66, 851~857.
5. Hu, F., Matuda, K., Tokai, T. and Haruyuki, K.(1995) : Dynamic analysis of midwater trawl system by a two-dimensional lumped mass method, Fisheries Science. 61, : 229~233.
6. Bessonneau, J. S. and Marichal, D.(1998) : Study of the Dynamics of Submerged Supple Nets (Applications to Trawls), Ocean Eng. 25(7), 563~583.
7. Niedzwiedz, G., Hopp, M.(1998): Rope and net calculations applied to problems in marine engineering and fisheries research, Arch. Fish. Mar. Res. 46(2), 125~138.
8. Leitzke, H. and Niedzwiedz, G. (1985) : Calculation of fishing gear as discrete models, ACTA ICHTHYOLOGICA ET PISCATORIA vol.XV Fasc. 2.
9. Provot, X.(1995) : Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior, Graphics Interface '95, 14 7~154.
10. Esbrun, M., Schrder, P. and Barr.(1995) : A. Interactive animation of structured deformable objects, Graphics Interface '95.
11. Newmark N. M. and ASCE, F. A.(1959) : Method of Computation for Structural Dynamics, Journal of the ENGINEERING MECHANICS DIVISION, 67~94.