

트롤 어구에 대한 가상 고등어의 반응 행동 시뮬레이션

이건호 · 이춘우^{1*} · 김영봉² · Pingguo HE³ · 최무열

부경대학교 수산물리학과, ¹부경대학교 해양생산시스템관리학부,
²부경대학교 전자컴퓨터통신공학부, ³뉴햄프셔대학교 지구해양분석연구소

Simulation of the virtual mackerel behavior to the trawl gear

Gun-Ho LEE, Chun-Woo LEE^{1*}, Young-Bong KIM², Pingguo HE³ and Moo-Youl CHOE

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

²Division of Electronic, Computer and Telecommunication Engineering,

Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

³Institute for EOS/Ocean Process Analysis Laboratory, University of New Hampshire,

137 Morse Hall, 39 College Road Durham, NH 03824, USA

This paper focuses on the mackerel's visual ability and swimming capability, and aims to describe the behavior in capture and escape process by trawl. The visual sensory systems and reaction behavior based locomotory capability were analyzed and simulated. The ability of fish to see an object depends on the light intensity and the contrast and size of the object. Swimming endurance of the fish is dependent on the swimming speed and the size of the fish. Swimming speeds of the fish are simulated 3 types of the burst speed, the prolonged speed and the sustained speed according to the time they can maintain to swim. The herding and avoiding is typical reaction of the fish to the stimuli of trawl gear in the capture process. These basic behavior patterns of the virtual mackerel to the gear are simulated. This simulation will be helpful to understand the fishing processes and make high selectivity of fishing.

Key words : Fish behavior, Fishing simulator, Visual ability, Swimming, Trawl gear

서 론

어류의 행동 중 어획과 관련 있는 요소는 어구에 의해 유발되는 자극에 대한 어류의 반응 행동

이다. 어류의 행동에 영향을 주는 자극원은 소리, 시각, 진동 등이 있다. 어선 또는 어구가 원거리에서 근접해 올 때 어류는 본능적으로 어선의

*Corresponding author: cwlee@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-620-6123, Fax: 82-51-622-3306

엔진 소리나 스크류의 회전 소리에 우선적으로 반응한다. 이러한 어선의 소음은 어류의 유영방향이나 유영수심 변화에 영향을 미친다. 그러나 어구가 근거리에서 있을 때에는 소리보다 시각에 의존하여 반응을 한다. 어류의 시각은 어류의 군집, 색, 포식자나 장애물의 회피와 같은 어류 행동을 결정하는 중요한 감각 기능이다(Freon and Misund, 1999). 특히 군집 행동 패턴을 유발시키는 회피 반응은 어획량과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 어류의 시각적 감각은 조도, 공간분해능, 물체형태 구분능력, 색깔 등의 다양한 요소로 측정될 수 있다. 그러나 수중의 조명 조건과 어구의 시각적 자극을 고려할 때 어류의 시각적 감각은 수중의 조도와 어류의 고유 시력(visual acuity), 그리고 어류와 대상 물체 사이의 거리에 따른 물체의 상대적 크기에 의해 결정된다고 할 수 있다(Kim and Wardle, 1998).

수중의 조도가 감소하면 어류의 시력은 지속적으로 감소하며, 시각적 자극역치 이하의 조도에서는 어구가 어류 가까이 근접하여도 반응이 일어나지 않는다. 어류의 시력은 특정 거리에서 어류가 물체를 구분할 수 있는 척도를 나타내며, 어종과 체장 및 수중의 조도에 따라 다르게 나타난다(Douglas and Hawryshyn, 1990). 어구의 시각적 자극으로 야기되는 어류의 반응 행동은 군집 또는 회피 반응이다. 이러한 행동들을 지속할 수 있는 시간은 어류의 유영 지구력에 의해 제한되어 있으며, 유영 지구력은 유영 속력에 종속적이다. 어류의 유영속력은 어류가 유영할 수 있는 지속시간과 사용 근육의 종류에 따라 돌진속력(burst speed), 유지속력(prolonged speed), 순항속력(sustained speed)으로 구분된다(He and Wardle, 1988; He, 1993).

본 연구에서는 어로 시뮬레이터에서 사용될 가상 어류(virtual fish)의 행동을 어구의 시각적 자극과 반응에 초점을 맞추어 시뮬레이션 하였다. 가상 어류로 선택된 어종은 생태 및 유영 능력에 대한 자료가 비교적 풍부한 대서양 고등어

이다. 컴퓨터 가상공간에서 구현된 가상 고등어는 각 개체마다 독자적인 시각능력을 가지고 있어서 어구에 의한 시각 자극에 독립적으로 반응하고, 여러 마리가 있을 경우에는 어군을 형성하여 어군으로서 어구에 대해서 반응한다. 가상 고등어의 반응은 유영 행동으로 나타난다. 유영 행동은 유영 속력에 따라 지속시간이 다르게 모델링 되었다. 즉, 각각의 가상 고등어는 일정한 체력을 가지고 있고, 체력은 유영 속력에 따라 소진되는 정도가 달라져서 빠르게 유영하면 체력이 급격하게 고갈되고, 느리게 유영하면 오래 동안 유영할 수 있다. 유영을 계속해서 체력이 완전히 고갈되면 가상 고등어는 가라앉지 않을 정도의 최저 속력으로 유영하게 된다. 이러한 가상 고등어의 행동 모델을 어로 시뮬레이터에 적용할 경우의 타당성을 입증하기 위해서 트롤 어구에 대한 가상 고등어의 반응 행동을 시뮬레이션 하여 일반적으로 알려진 어구에 의한 군집 및 회피 행동이 적절하게 구현되는지를 분석하였다.

재료 및 방법

가상 고등어의 시각능력 모델링

시야 모델링

트롤 어구의 진행 경로 상에 위치한 어류는 어구의 존재를 시각적으로 인지하자마자 어구에 대한 반응 행동을 나타낸다. 어류가 어구의 존재를 인지하기 위해서는 어구가 어류의 시야 범위 내에 있어야 한다. 대부분의 어류는 유선형의 머리 양쪽에 각각 하나씩의 눈을 가지고 있어서 동시에 양쪽 눈으로 물체를 보는 양안시(binocular vision) 보다 각각의 눈이 다른 이미지를 보는 단안시(monocular vision)가 큰 비중을 차지한다. 단안시의 수평 범위는 170 - 180°, 양안의 경우는 20 - 30° 이다(Wardle, 1993). 어류는 물체가 양안의 범위에 있을 때 물체의 형태를 잘 인식할 수 있으며 보다 정확하게 거리를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 가상 고등어의 시야를 모델링 하기 위해서 양안과 단안의 자세한 기능 표현은

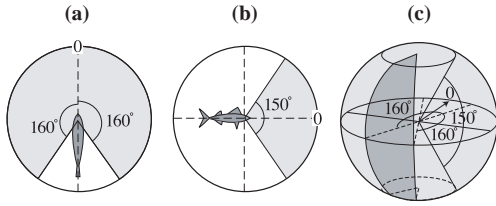


Fig. 1. Modeling of the horizontal and vertical field of vision. Top view-horizontal visual field (a), side view-vertical visual field (b) and 3D view (c).

생략하였으며 Fig. 1과 같이 어류의 머리 방향을 0°로 정하여 좌우 각각의 160° 범위를 수평시야로 그리고 위 아래 150° 범위를 수직 시야로 가정하였다.

시각적 인지거리 계산

어류의 시력은 어류가 물체를 볼 수 있는 최대 거리를 결정하며(Douglas and Hawryshyn, 1990) 망막에 있는 시세포의 밀도와 물체의 크기에 종속적이다(Zhang and Arimoto, 1993). 명태의 시세포 밀도를 조사하는 연구에서 Zhang and Arimoto(1993)는 망막의 최소분해각이 0.17°임을 알아냈으며(Fig. 2), 다음 식에 의해 최대 인지거리를 계산하였다.

$$D = \frac{l}{\alpha} \quad (1)$$

여기서 l 은 물체의 크기이며 α 는 최소 분해각 (radian)을 의미한다. 이 방법에 따르면 명태는 4cm 크기의 물체를 13m 거리에서도 인지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 눈의 최소 분해각이 커질수록 가지거리는 짧아진다. 본 연구에서는 접근하는 어구에 대해 가상 고등어가 인지할 수 있는 인지거리는 식 (1)에 의해서 결정된다고 가정하였고 고등어 눈의 최소 분해각은 Kim(1998)의 연구를 따랐다.

한편 같은 크기의 물체라도 조도, 어류와 물체 사이의 거리에 따라서 눈에 보이는 크기가 달라지는데 일반적으로 조도가 낮을수록 거리가 멀

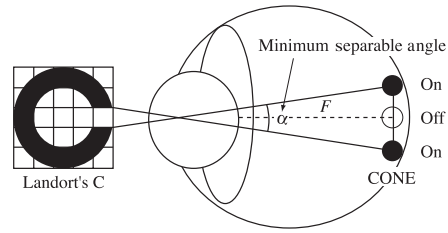


Fig. 2. Minimum separable angle of fish(Arimoto, 2006).

수록 실제로 보이는 물체의 크기는 작아진다. 그러므로 보다 정확한 인지거리 계산을 위해서는 눈에 보이는 물체의 크기 즉, 가시적 크기를 고려해야한다. 또한 물체의 가시적 크기는 물체와 주변 배경의 명암대비 값에도 영향을 받는다. 어류의 명암대비 구분 능력은 사람과 비슷하다(Anthony, 1981). 물체와 배경간의 명암대비가 감소할수록 어류의 반응 거리는 감소하며 명암대비 역치 이하에서는 반응을 하지 않는다(Anthony, 1981). 본 연구에서는 대상 물체의 가시적 크기가 물체의 고유 명암대비와 거리에 따른 상대적인 명암대비의 비로 결정된다고 가정하였다. 또한 대상 물체의 상대적인 명암대비가 가상 고등어의 명암대비역치보다 작을 경우 물체를 인지하지 못하는 것으로 가정하였다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$l_r = l \frac{C_r}{C_0}, (C_r \geq C_t) \quad (2)$$

여기서 l_r 은 물체의 가시적 크기, l 은 물체의 실제 크기, C_r 은 거리에 따른 물체의 상대적인 명암대비, C_0 는 물체의 고유 명암대비를 나타낸다. C_t 는 고등어가 구분할 수 있는 명암대비의 역치로 Kim(1998)의 연구 결과를 그대로 사용하였다. C_r 은 Duntley(1962)의 방정식을 통해 구할 수 있다. 이 식은 다음과 같다.

$$C_r = C_0 \exp(-r\beta) \quad (3)$$

여기서 r 은 가상 고등어와 물체 사이의 거리, β 는 빔 감쇄 계수를 나타낸다.

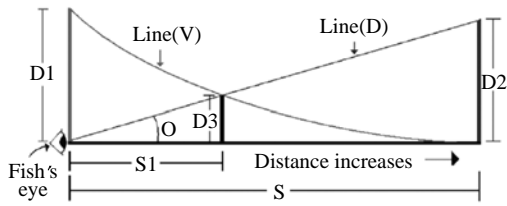


Fig. 3. Maximum perceptible distance and change of discernable size of the object in relation to distance between the fish and the object. Letter symbols are : D1-measured size of the object; D2-minimum size of the object fish can be perceptible at the distance S; D3-object size at the maximum perceptible distance S1.

따라서 가상 고등어가 어구를 볼 수 있는 최대 인지거리는 식 (2)와 최소 분해각 \$A\$를 식 (1)의 분자와 분모에 각각대입하여 다음과 같이 구할 수 있다

$$S_{max} = \frac{l_r}{A \times \pi / 180 \times 1/60} \quad (4)$$

여기서 \$A\$는 가상 고등어의 최소 분해각(arc min)이다.

Fig. 3은 최대인지 거리의 개념과 대상물체와 가상고등어 사이의 거리에 따른 물체의 가시적 크기 변화를 설명한다. Fig. 3에서 Line(V)는 식 (2)에서 계산된 거리에 따른 물체의 가시적 크기 변화를 나타낸다. Line(D)는 최소 분해각 \$O\$에서 거리 변화에 따라 인지할 수 있는 물체의 최소 크기 변화를 나타낸다. 최대 인지 거리는 두 선의 교차지점인 거리 \$S_1\$에서 결정된다.

가상 고등어의 유영 능력 모델링

유영 속력과 지구력

어류의 유영 능력은 특정 유영 속력으로 얼마 동안 유영이 가능한가에 의해 결정된다. 어류가 200분 이상 지속할 수 있는 유영 속력을 순항속력, 15초 -200분미만의 시간 동안 유지할 수 있는 유영 속력을 유지속력, 15초미만의 시간동안만 지속할 수 있는 유영 속력을 돌진속력이라고 한다(Webb, 1975; Hoar and Randall, 1978). Fig. 4

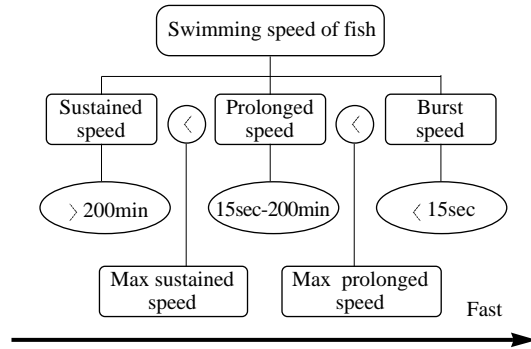


Fig. 4. Scheme of fish swimming system.

는 이러한 유영 시스템의 개념을 나타낸다.

최대 순항속력(maximum sustained speed)은 순항속력과 유지속력을 구분하는 역치로 어류가 200분 동안 유지할 수 있는 최대 속력을 의미한다. 고등어의 최대 순항속력은 수온 11.7 °C, 33cm의 체장에서 3.5Ls⁻¹(He and Wardle, 1988)이며 체장 증가에 비례한다(He, 1993). 본 연구에서는 He(1993)가 제시한 순항속력을 사용하였다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$U_{ms} = 1.64L^{0.32} \quad (5)$$

여기서 \$L\$은 체장을 나타낸다. 유지속력은 최대 순항속력보다 높은 속력으로 유영할 때 발생하며 이때부터 지구력이 감소하기 시작한다. 유영 지구력은 지수적인 시간 경과에 따라 선형적으로

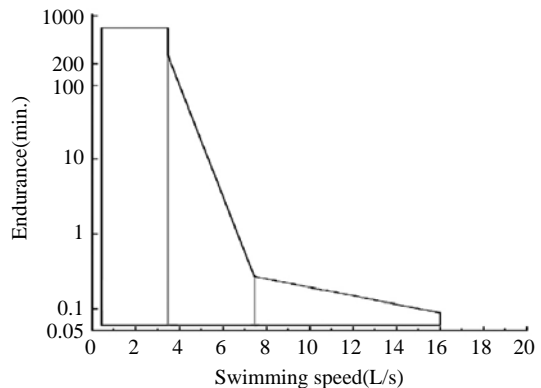


Fig. 5. Swimming speeds of mackerel in relation to endurance time.

로 감소한다. 식 (6)은 고등어의 유지속력과 유영지구력의 관계를 나타낸다(He and Wardle, 1988).

$$\log E = -0.96U + 5.45 (r = -0.85) \quad (6)$$

여기서 E 는 유영지구력(min), U 는 유영속력(Ls^{-1})을 나타낸다. 돌진 속력은 Wardle(1988)의 연구 결과를 따라 고등어 체장의 20배로 가정하였다. Fig. 5는 고등어의 유영 속력과 유영 지구력의 관계를 나타낸다.

유영 속력의 모델링

고등어는 순항속력에서는 사실상 지구력의 제약 없이 유영을 지속할 수 있으나, 유지속력에서는 지구력이 빠르게 감소한다. 고등어는 포획한 후 수조에 다시 풀어주는 순간, 또는 순항속력이나 유지속력으로 유영을 하는 고등어에게 강한 자극을 주었을 때는 급격히 빠른 속력, 즉 돌진속력으로 유영하는 행동을 일시적으로 나타내나 수 초 안에 지치게 된다. 이와 같이 특정한 유영 속력 이상에서 지구력이 급격히 감소하여 지치는 현상은 주변상황과 유영 속력의 변화에 따라 고등어의 체내에서 사용하는 근육이 다르기 때문이다. 따라서 가상고등어의 유영 행동을 모델링 할 때 어구에 의한 자극의 크기에 따라 유영속력(순항, 유지, 돌진)중의 하나가 선택되게 하였으며, 각 유영 방식에 대해 다른 유영속력 계산식을 적용하였다. 유영 속력의 변화시점은 최대순항속력과 최대 유지속력을 기준으로 하였다.

대서양 고등어(Atlantic mackerel)는 부레가 없고 해수보다 비중이 높기 때문에 최소 $0.4Ls^{-1}$ 의 유영 속력을 유지해야가라앉지 않는다. 따라서 시뮬레이션에 적용된 고등어의 최소 유영속력은 $0.4Ls^{-1}$ 이며 어구 자극이 없는 상태에서의 유영 속력은 선호유영속력(preferred speed)인 $0.9Ls^{-1}$ 에서 $3.5Ls^{-1}$ (최대순항속력)로 한정하였다. 가상고등어가 어구와 조우하였을 때는 어구

를 회피하기 위해 유지속력으로 유영하다가 수 초 후 어구와 비슷한 속력으로 일정한 거리를 유지하면서 유영하도록 하였다. 어구의 예망 속력이 가상 고등어의 최대순항속력보다 빠를 경우는 가상 고등어의 유영속력이 자동적으로 순항속력에서 유지속력으로 변하게 하였다.

가상고등어와 어구사이의 거리가 20cm 이하가 되었을 때는 돌진속력으로 유영하게 하였다. 가상고등어의 유영 능력은 체장에 비례하므로 현실감 있는 시뮬레이션을 위해 가상고등어 어군의 체장 조성 범위를 다양하게 하였다. 고등어는 생후 2년이 지나면 성어가 되어 체장이 26cm 가 되고 3년이 되면서 성장속도가 서서히 둔화되어 7-8년이 지나면 약 40cm에 이르게 된다 (Anderson, 1973; Isakov, 1973). 이를 근거로 가상고등어 어군의 체장 범위를 26-40cm로 하여 랜덤하게 생성하였다.

트롤 어구 모델

트롤 어구에 대한 가상고등어의 반응 행동을 시뮬레이션하기 위해서는 트롤 어구 모델이 필요하다. 뿐만 아니라 트롤 어구 모델이 수중에서 예망되는 상태를 시뮬레이션 해야 하므로 이에 대한 추가적인 수치 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 추가적인 계산 및 모델링의 비

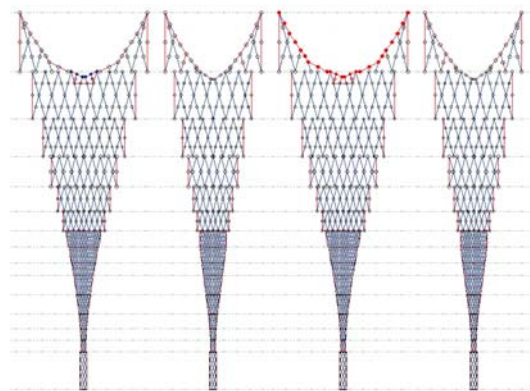


Fig. 6. The designed mid-water trawl net for the simulation.

용을 줄이기 위해 트롤 어구 설계 및 시물레이션 전용 소프트웨어(SimuTrawl)를 사용하여 트롤 어구를 설계하고, 수중에서의 거동을 시물레이션 하였다. 설계된 트롤 어구는 4매식 중층 트롤 어구로써 전장이 약 135m, 끌줄 및 후릿줄의 길이는 각각 350m, 40m였다.

뜸줄의 길이는 44m, 뜸의 직경은 300mm, 뜸 간격은 평균 135cm였다. 발줄은 직경 16mm 체인이 연결된 구조이며 길이는 44m였다. 전개판은 높이 3m, 폭 2m, 수중 무게는 1800kg이었다. 시물레이션을 통해 그물을 4knots로 예망했을 경우 망폭과 망고는 각각 27m, 18m였다. Fig. 6은 시물레이션에 사용된 설계 프로그램을 사용하여 설계한 중층 트롤 어구를 나타낸다.

결과 및 고찰

가상 고등어의구집 행동

예망 속력 4 knots, 수심 150m, 조도 1 log cd/m²에서 현재 어군의 중심 위치가 트롤 예망 궤도 중심과 거의 일치하는 상태를 가정하고 시물레이션 하였을 때, 트롤 어구와 조우한 가상 고등어 어군은 가장 먼저 끌줄과 전개판에 대해 반응하였다. 끌줄에 대해서는 매우 미미한 반응을 보였으며 상대적으로 크기가 큰 전개판에 대해서는 Fig. 7에서와 같이 비교적 먼 거리에서부터 반응을 하였다.

전개판이 근접함에 따라 일부 어군은 그물 바깥쪽으로 도피하였고 나머지는 안쪽으로 구집되었다. 그러나 양쪽 전개판 사이에 위치하면서 전개판을 보지 못한 어군은 망구 쪽을 향하여 유영하였다. 후릿줄 근처에 도착한 어군의 일부는 그물 안쪽으로 구집되어 망구 쪽으로 계속 유영하였으나 후릿줄과 거리가 많이 떨어진 어군은 반응하지 않고 후릿줄을 통과하였다.

어군이 망구 근처까지 도달하였을 때는 뜸줄과 발줄로 구성된 뚜렷한 시각적 자극 요소 때문에 비교적 먼 거리에서도 반응을 하였다. 이때 접근하는 어구의 한부분에 대한 반응은 일반적

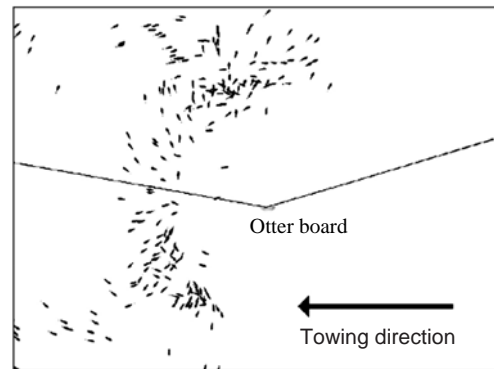


Fig. 7. Herding behavior of virtual mackerel to the otter board.

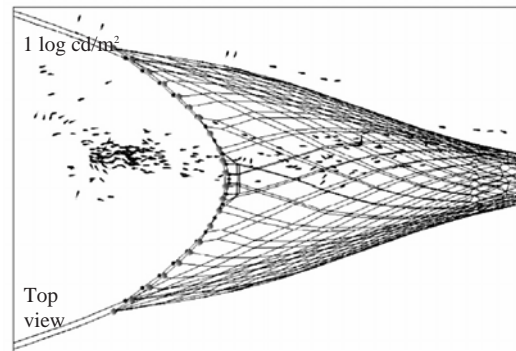


Fig. 8. Reaction behavior of virtual mackerel to the trawl net mouth.

으로 알려진 장애물의 반대방향으로 유영하는 행동이 구현되었다. Fig. 8에서와 같이 망구 앞쪽에 구집된 가상 고등어는 어구의 예망 방향과 같은 방향으로 유영을 하다가 지구력이 다하여 지치게 되면 유영 속력이 감소하면서 끌자루 쪽으로 들어갔다.

조도에 따른 구집 패턴

조도 변화에 대해서는 조도가 낮아질수록 고등어가 어구에 반응하는 거리가 짧아졌고 구집율도 낮아졌으며 탈출율은 상대적으로 높아졌다.

Fig. 9는 전개판 근처를 지나가는 가상 고등어 어군에 대해서 조도를 달리했을 때의 시물레이션 결과를 나타낸다. 조도가 높을수록 전개판을

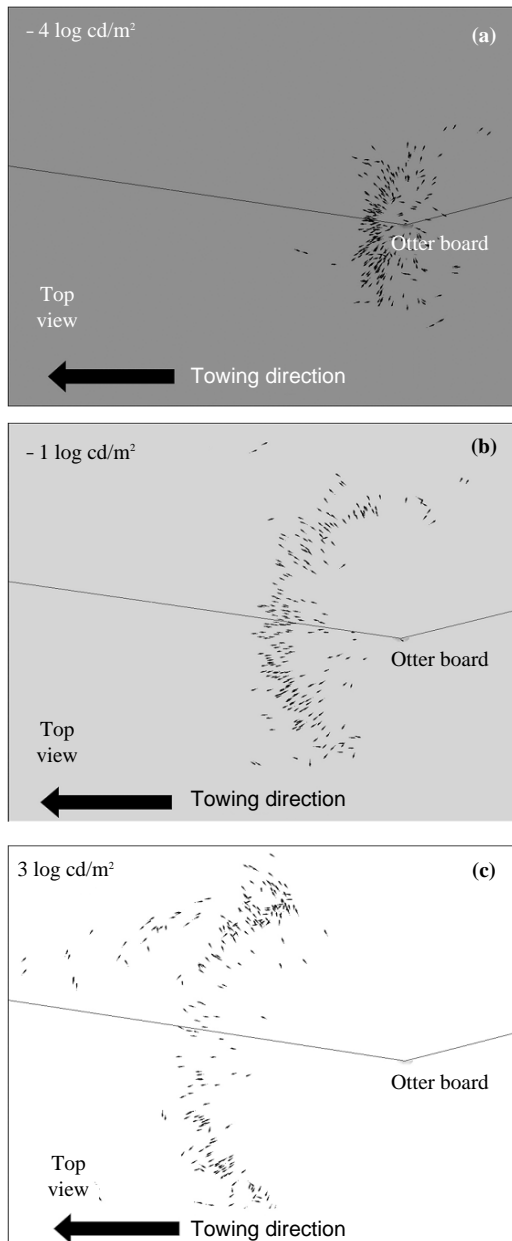


Fig. 9. Change of the reaction behavior to the otter board according to the light intensity.

인식하는 거리가 길어져 회피반응을 일찍 시작하였다. 그리고 조도가 낮을수록 반응 거리가 짧아져 $-4 \log \text{cd/m}^2$ 의 조도에서는 전개판 근처를 그대로 통과하기도 하였다.

망구 근처에서 구집되어 예망 방향으로 유영하던 고등어들은 Fig. 10의 (b)에서 보는 바와 같이 조도가 높을수록 규칙적인 정위현상(ordered distribution pattern)을 보였다. 그러나 Fig. 10의 (a)에서처럼 필요이상의 조도($3 \log \text{cd/m}^2$)에서는 대부분의 어류가 어구 반대 방향으로 회피하여 달아났다. 반대로 Fig. 10의 (c)에서와 같이 낮은 조도($-5 \log \text{cd/m}^2$)에서는 전개판의 경우와 마찬가지로 많은 고등어들이 그물을 보지 못하고 그대로 통과하였다. 고등어의 이와 같은 구집행동패턴의 변화는 1989년에 수행된 Glass and Wardle의 연구에서 보고된 행동과 잘 일치하였다.

어획과정에서 수중의 조도는 어류의 구집에 중요한 영향을 미친다. 그러나 본 시뮬레이션에 따르면 조도가 무조건 높아진다고 해서 어획률이 높아진다고 단정 지을 수는 없었다. 시뮬레이션 결과, 필요이상의 높은 조도조건에서 어류의 유영 능력이 좋을 경우에는 어류가 망구 근처에 도달하기도 전에 먼 거리에서 뜸출과 발출을 인지하고 달아났기 때문이다. 따라서 대상어류가 가지는 시각적 인지 능력, 어장의 조도 및 예망 속도 등을 종합적으로 고려하여 최적의 조업조건을 도출하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

본 연구는 가상 고등어의 반응행동을 시각 및 유영 능력에 초점을 맞추어 기술하였다. 또한 수중 조도 변화에 대한 가상 고등어의 반응행동을 시뮬레이션 하기 위해 수중 조도에 따라 물체의 가시적인 크기가 달라지며 인지거리가 변화한다는 가정을 세웠다. 향후 수중 조도에 따른 고등어의 시각 능력에 대한 진보된 연구가 이뤄진다면 특정 조도에서 어느정도 크기의 어구요소를 인지하고 어떻게 행동하는지에 대해 보다 정확한 시뮬레이션이 수행될 수 있을 것이다.

고등어의 시력은 소리에 의한 자극보다는 가까운 거리에서 적용할 수 있는 감각이나 보다 가까운 거리에서는 측선 감각에 의한 반응행동도 고려해야한다. 측선 감각은 어구에 대한 회피 행

동뿐만 아니라 선택성에도 영향을 미칠 것으로 생각한다. 또한 측선 감각이 구현된다면 조류의 흐름에 따른 유영 방향의 변화도 시뮬레이션 할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 요소들을 분석하고 적절하게 모델링 하여 시뮬레이션을 수행한다면 고등어의 행동을 보다 정확히 예측할 수 있으며 어획률과 어획 선택성 향상에도 기여할 수 있을 것으로 보인다. 또한 본 연구에서 다루지 않았지만 어업자원으로서 중요한 다른 어종에

대해서도 이러한 시뮬레이션 기법을 적용한다면 어종간의 행동 특성을 보다 명확히 구별할 수 있고 어획과정을 이해하고 선택성 높은 어구 설계에도 도움이 될 것으로 생각된다.

결론

본 연구에서는 어로 시뮬레이터 개발에 필요한 요소인 어군행동을 구현하기 위해 시각능력과 유영 기능을 가진 가상 고등어를 모델링 하였

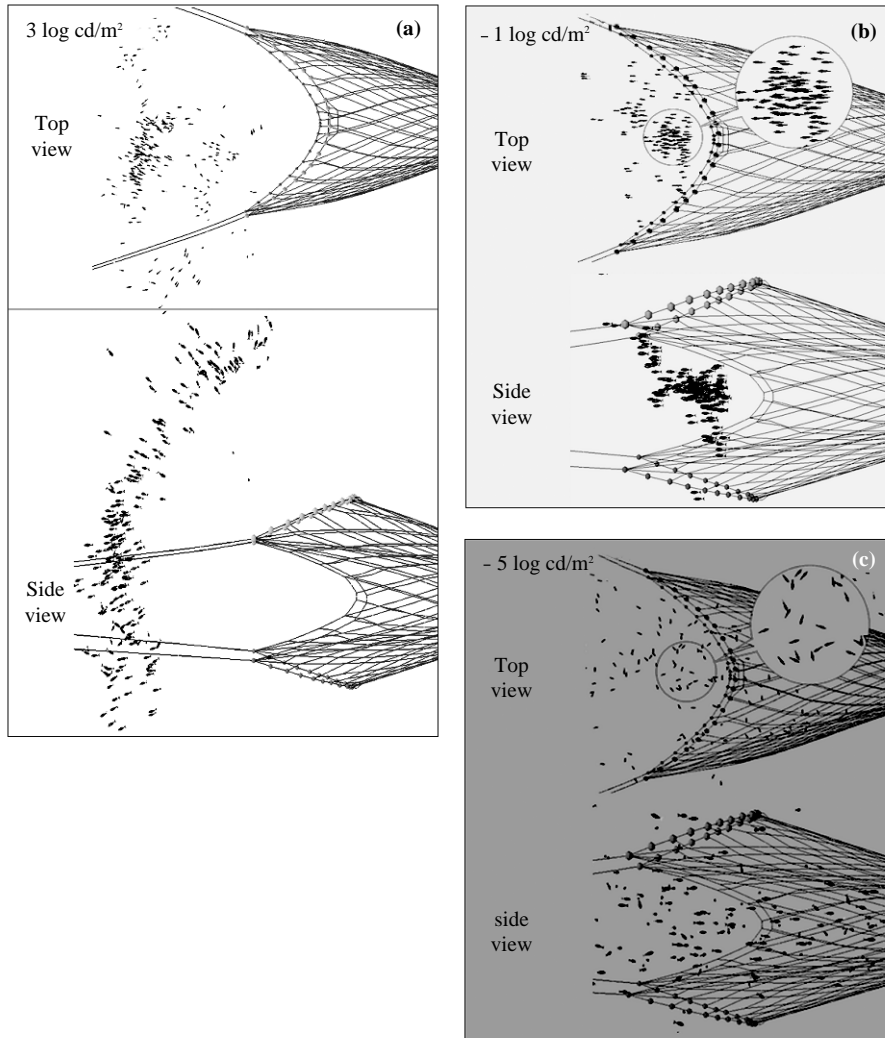


Fig. 10. Distribution pattern of the fish to the trawl net according to the light intensity.

고, 트롤 어구의 시각 자극에 대한 가상 고등어의 반응 행동을 시뮬레이션 하였다. 가상 고등어의 시각적 능력은 시각 세포의 밀도에 의해 자연적으로 결정되는 고유시력과 어구와 가상 고등어 사이의 거리에 따른 대상 어구의 가시적 크기, 수중 조도, 어구 재료의 명암대비를 통해 가상 고등어가 물체를 인지할 수 있는 시각적 인지 거리의 크기로 표현되며 이는 수중의 조도가 높고 어구와의 거리가 가까울수록 그리고 어구 요소의 명암대비가 뚜렷할수록 크게 나타났다. 어류의 수영 능력은 수영 속력에 종속적이며 수영 속력은 수영 지구력을 결정한다. 가상 고등어의 수영 속력을 순항속력, 유지속력, 돌진속력으로 나누어서 가상 고등어의 시각적 인지 거리에 어구가 존재하지 않을 때는 순항 속력으로 수영하게 하였으며, 어구가 인지 거리에 나타났을 때는 자극 강도에 따라 유지 속력 또는 돌진속력으로 수영하게 하였다. 비교적 양호한 수중 조도에서 가상 고등어 개체들은 규칙적인 정위 현상을 나타내었고 구집률이 높았다. 그러나 지나치게 낮은 조도에서는 대부분의 가상 고등어들이 구집 행동 패턴을 상실하였다. 반대로 너무 높은 조도에서는 가상 고등어가 먼 거리에서도 어구를 인지하여 어군이 어구 근처에 도달하기 전에 어구의 예망 방향으로 달아나 구집률이 매우 낮았다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R012006000110250) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Anderson, E.D., 1973. Assessment of Atlantic mackerel in ICNAF Sub area 5 and Statistical Area 6. Int. Comm. Northwest Atl. Fish. (ICNAF) Res., Doc. 73/14, pp. 38.
- Anthony, P.D., 1981. Visual contrast threshold in the cod (*Gadus morhua*). J. Fish Biol., 87 - 103.
- Arimoto, T., 2006. Visual physiology of fish for better understanding of capture process. ICES mar. Sci. Symp., 57 - 58.
- Douglas, R.H. and C.W. Hawryshyn, 1990. Behavioural studies of fish vision: An analysis of visual capabilities. In: Douglas, R.H., Djamgoz, M.B.A. Eds., The Visual System of Fish. Chapman & Hall, pp. 373 - 418.
- Duntley, S.Q., 1962. Underwater visibility. In The Sea, Physical Oceanography, Vol 1, 452 - 455.
- Freon, P. and O.A. Misund, 1999. Dynamics of pelagic fish distribution and behaviour: Effects on fisheries and stock assessment. Fishing News Books, pp. 102 - 127.
- Glass, C.W. and C.S. Wardle, 1989. Comparison of the reaction of fish to a trawl gear at high and low light intensities. Fisheries Res., 7, 249 - 266.
- He, P. and C.S. Wardle. 1988. Endurance at intermediate swimming speeds of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*), herring (*Clupea harengus*), and saithe (*Pollachius virens*). J. Fish Biol., 33, 255 - 266.
- He, P., 1993. Swimming speeds of marine fish in relation to fishing gears. ICES mar. Sci. Symp., 196, 183 - 189.
- Hoar, W.S. and D. J. Randall, 1978. Fish Physiology. Locomotion (Vol 7), New York Academic Press. pp. 13.
- Isakov, V. I., 1973. Growth and total mortality of mackerel from the New England area. Int. Comm. Northwest Atl. Fish. (ICNAF) Res. Doc. 73/23, pp. 4.
- Kim, Y.H., 1998. Modelling on contrast threshold and minimum resolvable angle of fish vision. Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 34(1), 43 - 51.
- Kim, Y.H. and C.S. Wardle, 1998. Modelling the visual stimulus of towed fishing gear. Fisheries Res., 34, 165 - 177.
- Wardle, C.S. and P. He, 1988. Burst swimming speeds of mackerel (*Scomber scombrus*). J. Fish Biol., 32, 471 - 478.
- Wardle, C.S., 1993. Fish behaviour and fishing gear. In: Pitcher T.J. (Ed.), Behaviour of Teleost Fishes, second ed. Chapman & Hall, London, pp. 609 - 644.
- Webb, P.W., 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. Bull. Fish. Res. Board of Canada, 190,

- pp. 1 - 158.
- Zhang, X.M. and T. Arimoto, 1993. Visual physiology of walleye pollock(*Theragra chalcogramma*) in relation to capture by trawl net. ICES Mar. Sci. Symp., 196, 113 - 116.
- Zhou, Y., 1985. Swimming behaviour of fisher at high speeds. J. Fish. China, 9(2), 105 - 119.
-
- 2007년 12월 26일 접수
2008년 2월 5일 수리