

## 모형실험과 시뮬레이션을 통한 활어 이송용 예인 가두리의 수직 및 수평 전개력 추정

박수봉 · 이춘우<sup>1\*</sup>

부경대학교 수산물리학과, <sup>1</sup>부경대학교 해양생산시스템관리학부

### Estimation of vertical and horizontal spreading force of the towing cage for transporting the live fish by model test and simulation

Subong PARK, Chun Woo LEE<sup>1\*</sup>

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

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

Nowadays, consumption of fisheries products is increasing. There are several factors, one of which is a quantitative development through aquaculture. Another factor is an increase qualitative consumption of fish which require that fish be supplied alive. This requires a lot of technical effort to transport the live fish that have low survival rate (*c.f. tuna and mackerel*) in coastal waters and in the open sea. To develop a towing cage for transporting the live fish, model test in a circulate water channel and simulation by computer tool were carried out. In order to spread vertically, floats were attached at the upper part of the cage, and iron chains attached at the lower part of the cage. For horizontal spreading, kites were attached on the cage. The tension and spreading performance of the cage were measured. The result shows that the tension and reduction ratio of inside volume of the cage were tended to increase with increased towing speeds. The suitable operation condition in towing cage was 1.0 m/s towing speeds with vertical spreading force 8.7 kN, horizontal spreading force 5.6 kN; in this case the reduction ratio of inside volume of the cage was estimated as 25%.

Keywords : Towing cage, Simulation, Model test, Live fish, Spreading force

#### 서 론

수산물 생산은 전통적으로 잡는 어업이 대표적이었으나, 현재는 수산자원 감소와 연안국의 자원 자국화 정책 등의 영향으로 생산량이 급격히 감소함으로써, 전 세계적으로 수산물의 공급 부족이 예고되고 있다. 2020년 세계 수산물이 2,300만톤이 부족할 것으로 전망되며, 이러한 수산식량 위기를 해결할 수 있는 대안으로서 양식

업의 중요성이 날로 커지고 있다. 또한, 2015년에는 수산물 생산에서 양식업의 생산 비중이 처음으로 어선어업을 넘어서 수산물 공급에서 차지하는 비중이 더욱 높아질 것으로 예상되고 있다. (FAO, 2012)

수산물 소비의 증가 배경에는 양식생산을 통한 양적 성장뿐만 아니라 활어 상태로 접하기 어려운 어종에 대한 질적 수요도 함께 증가하면서, 외해 및 연근해에서

\*Corresponding author: [cwlee@pknu.ac.kr](mailto:cwlee@pknu.ac.kr), Tel: 82-51-629-5891, Fax: 82-51-629-5886

어획된 고등어나 참치와 같이 어획 후 생존율이 낮은 어종의 활어 운반을 위한 기술적 요구도 함께 이루어지고 있다. 일반적으로 어획된 어류는 선박의 어창을 이용하여 보관 및 운반이 이루어지지만, 어중에 따라서는 이와 같은 방법은 치사율이 높거나, 대량 어획일 경우 어창 용적의 제한으로 어류의 밀도가 높아져 활어 상태의 운반이 사실상 어려운 경우도 있다. 따라서 외해 및 연근해에서 어획된 어종을 활어 상태로 양식장이나 육지로 옮기기 위한 장치 및 구조물의 개발이 필요하다.

활어를 운반하는 기술은 조업현장에서 어획된 어류를 예인 가능한 가두리에 옮긴 후 선박으로 끌어서 이송하는 기술과 어획한 대량의 참다랑어를 선망 그물로 포위한 뒤 어포부를 예인하는 방법 (Kreiberg and Solmie, 1987), 강 하구지역에서 예인 가능한 가두리를 통한 대서양 연어 양식 (Rottiers and Donald, 1991) 등이 연구되었다. 최근에는 어중에 따른 가두리 이송 능력 평가 (Malcolm, 2008), 에너지 효율이 높은 모터를 가두리에 적용시키는 개념을 도입한 스스로 운항 능력이 있는 양식용 가두리 연구 (Goudey, 2009) 등이 진행되었다. 참다랑어 축양이 성행하고 있는 호주에서는 직사각형으로 변형한 가두리를 예인줄에 연결하여 선박으로 끌고 가는 방법을 사용하고 있으며, 일본에서는 이송 중 생존율을 높이면서 이송 속도를 기존의 0.25 m/s에서 0.5~0.6 m/s로 2배 가까이 향상시킴과 동시에 가두리 변형을 방지하기 위한 물뿔을 부착한 유선형 어류 운반 가두리가 개발되었다. 그러나 우리나라에서는 참다랑어 이송 시스템 개발에 관한 연구 (NFRDI, 2012) 외에는 이송장치에 관한 연구가 거의 없다.

본 연구에서는 외해 및 연근해에서 어획된 회유성 어종인 고등어나 참치 등과 같은 어류를 활어 상태로 양식장 혹은 육지까지 안전하게 이송할 수 있는 가두리를 개발함에 있어, 운반 속도를 향상시킬 수 있는 활어 이송용 가두리를 설계하고, 모형실험과 시뮬레이션을 통하여 가두리 내부 용적 감소율과 예인줄에 작용하는 저항을 분석하여 적절한 수직 및 수평 전개력을 추정하고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 활어 이송용 예인 가두리의 구조 및 규격

본 연구의 대상 활어 이송용 가두리는 Fig. 1과 같이 가로 27 m, 세로 6 m, 높이 6 m 크기의 직육면체 그물감

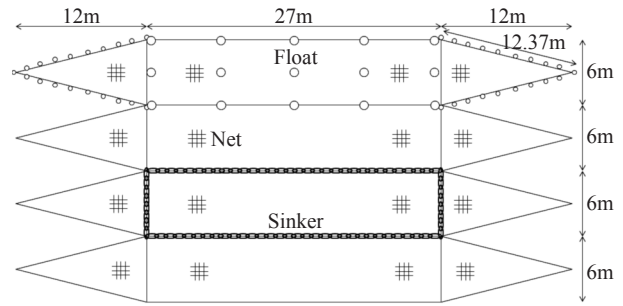


Fig. 1. Schematic drawing of a towing cage.

Table 1. Specifications of the towing cage

Item	Specification
Net	
Size (m)	27×6×6
Material	PA(Nylon)
Diameter (mm)	10
Mesh type	Square
Length of bar (mm)	120
Kite	
Size (m)	3×6

에, 가두리 앞뒤로 뿔 형태의 그물을 부착하였다. 그물은 한 발의 길이가 12 cm, 직경 10 mm의 나일론 사각 그물감이다. 가두리의 수직 전개를 위해 상단에는 원형 뜰을 부착 (총 부력 6.3 kN)하였고, 하단에는 발뿔의 역할을 하는 체인을 모서리에 부착 (총 침강력 2.4 kN)하고, 수평 전개를 위해서 앞쪽과 2/3 지점의 좌우에는 가로 3 m, 세로 6 m 크기의 카이트를 부착하였다. Table 1에는 활어 이송용 예인 가두리의 그물감 및 카이트 사양을 나타내었다.

#### 활어 이송용 예인 가두리 시스템 모형 제작 및 실험

모형 가두리는 Fig. 2와 같이 그물, 뜰, PVC 파이프, 체인을 사용하고, Tauti 법칙을 적용하여 1/20로 축소하여

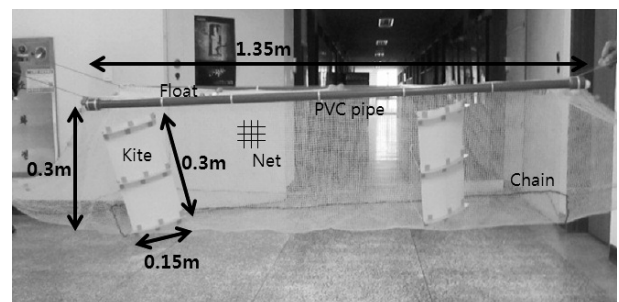


Fig. 2. Model cage.

제작하였다. 실제 가두리와 모형 가두리 사이의 관계는 다음 식과 같다.

$$\Lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1}{20} \quad (1)$$

$$V = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} = 0.22 \quad (2)$$

$$\frac{F_2}{F_1} = \Lambda^2 V^2 = 1.21 \times 10^{-4} \quad (3)$$

여기서  $\Lambda$ 는 축척비,  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 각각 실물과 모형의 각부 치수,  $d$ 는 망사의 직경,  $V$ 는 예인 속도의 비,  $F_1$ 과  $F_2$ 는 각각 실물과 모형에 작용하는 힘을 나타낸다.

모형 가두리는 가로 1.35 m, 세로 0.3 m, 높이 0.3 m의 직육면체의 가두리에 앞뒤로 뿔 형태의 그물을 부착하였으며, 직경 0.5 mm, 한발의 길이 6 mm인 나일론 라셀 그물감으로 만들어진 사각 그물감을 사용하였다. 가두리의 수직 전개를 위해 상단에는 내경 16 mm, 외경 22 mm인 PVC파이프와 원형 뜰을 부착하였고, 하단에는 황동 재질의 체인을 부착하여 침강력을 주었으며, 체인의 무게는 0.07 kg이다.

모형실험에서는 가두리 상부에 부착한 원형 뜰만으로는 형상 유지가 되지 않아 실험이 불가능하였다. 따라서 가두리 상부에 PVC파이프를 부착하여 가두리 형상을 유지시켰고, 원형 뜰과 같은 부력을 유지하였다.

가두리의 수평 전개를 위해서 앞쪽과 2/3지점에는 두께 1 mm의 캔버스 천을 가로 0.15 m, 세로 0.3 m 크기로 제작한 카이트를 부착하였고, 20~40° 범위에서 10° 씩 총 3단계로 각도 변화를 주었다.

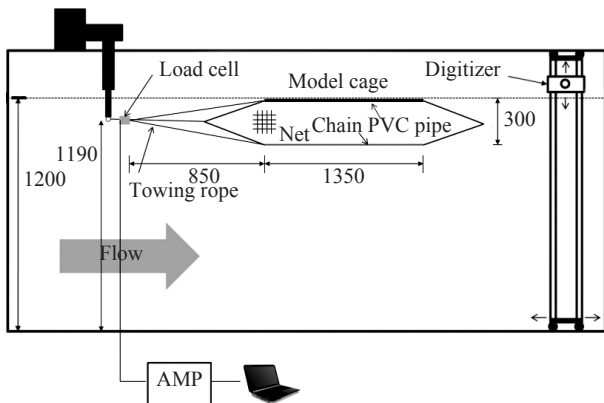


Fig. 3. Schematic drawing of a model cage installation.

실험에 사용된 수조는 수직 순환형 회류수조 (관측부 규격: 6 (L)×2.2 (W)×1.4 (H)m, PKNU, Korea)를 사용하였고, 회류수조의 유속은 프로펠러식 유속계 (VOT 2-200-20, 측정범위 : 0.03~2.0 m/s, KENEK, Japan)를 사용하여 0~0.5 m/s 범위에서 0.1 m/s 씩 총 6단계로 측정하였다. 모형 가두리 예인줄에 작용하는 저항은 예인줄에 로드셀 (SUMM-2K, 용량 : 20 kgf, SensTek, Korea)을 부착하여 계측하고, 디지털 카메라 (ixus 80 is, Canon, Japan)와 디지털타이저를 사용하여 계측하였다. 모형 가두리를 설치한 수조의 모식도는 Fig. 3과 같다.

### 가두리 운동 모델링

#### 운동 방정식

예인 가두리는 그물감과 예인줄에 뜰, 발돌 등의 속구가 부착된 구조이고, 외력에 의해 쉽게 형태가 변하는 유연체이다. 본 연구에서는 이 유연구조물을 유한개의 질점으로 나누고, 이들 질점들이 탄성이 있는 줄로 연결되어 있는 질량-스프링 모델로 간주하였다 (Fig. 4).

질량-스프링 모델을 유연 구조물의 해석에 적용한 예로는 트롤 그물에 적용한 Cha et al. (2003), 어류 양식 가두리에 적용한 Lee et al. (2008), 연승에 적용한 Lee et al. (2005), 선망에 적용한 Kim et al. (2007), Hosseini et al. (2011) 등의 선행 연구가 있으므로 여기서는 간략하게 모델을 설명한다.

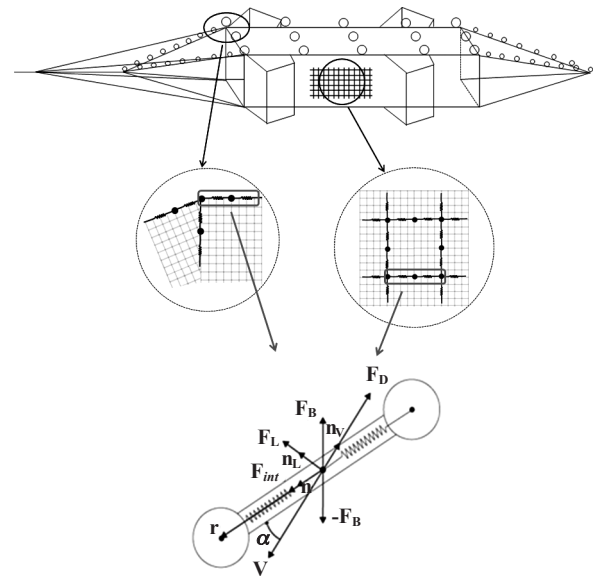


Fig. 4. Modeling a towing cage by a mass-spring model.

질량-스프링 모델에서 각 질점의 운동 방정식은 뉴턴의 제 2법칙으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{\mathbf{q}} = \sum \mathbf{f} \quad (4)$$

여기서,  $m$ 은 질량,  $\ddot{\mathbf{q}}$ 는 가속도 벡터,  $\mathbf{f}$ 는 힘 벡터로 내력과 외력으로 구성된다.

#### 내력과 외력

내력은 질점과 질점을 연결하는 스프링에 작용하는 힘으로, 힘의 크기는 스프링의 늘어난 길이에 비례하는 것으로 간주하였다. 외력은 외부로부터 각 질점에 작용되는 힘을 지칭하는 것으로, 가두리에 작용하는 힘은 부력, 침강력, 항력 및 양력이다. 항력의 방향과 크기는 그 물감이 흐름에 대해 받는 영각에 따라 달라지며, 이러한 요소들은 3차원 공간에서 흐름의 여부에 따라 달라진다. 흐름이 없는 경우는 질점에서의 속도벡터와 위치벡터가 이루는 각에 따라 항력계수 및 양력계수가 결정되고, 흐름이 있는 경우는 흐름에 의한 속도벡터의 합력속도 벡터와 질점의 위치벡터가 이루는 각도에 의해서 계수들이 결정된다.

본 연구에서는 조류의 영향만을 고려하였기 때문에 합력속도 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_m - \mathbf{V}_c \quad (5)$$

여기서,  $\mathbf{V}_m$ 은 질점의 운동 속도 벡터,  $\mathbf{V}_c$ 는 조류의 속도 벡터이다. 그리고 모든 흐름의 합력 속도 벡터  $\mathbf{V}$ 에 대해 항력과 양력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho S V |\mathbf{V}| \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{2} C_L \rho S V^2 \mathbf{n}_L \quad (7)$$

여기서,  $C_D$ 는 항력계수,  $C_L$ 은 양력 계수,  $\rho$ 는 유체의 밀도 ( $kgw \cdot s^2/m^4$ ),  $S$ 는 질점의 면적 ( $m^2$ )이다. 이것은 위의 식에서 결정된 각에 의해 계산되며,  $\rho$ 와  $S$ 는 항력과 같이 유체의 밀도, 질점의 면적이며,  $\mathbf{n}_L$ 은 양력의 작용 방향의 단위 벡터,  $V$ 는 속도 (m/s)이다.

부력과 침강력인  $\mathbf{F}_B$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}_B = (\rho_i - \rho_w) V_n \mathbf{g} \quad (8)$$

여기서,  $\rho_i$ 는 재료의 밀도,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도,  $V_n$ 은 재료

의 부피,  $\mathbf{g}$ 는 중력가속도이다.

예인 가두리를 구성하는 요소 중 그물감과 밧줄을 제외한 뜬, 발돌들은 그 모양이 변하지 않는 강체이므로 작용하는 항력계수 및 양력계수, 수중무게 등 물리적 파라메타는 변하지 않는 상수로 볼 수 있다. 그러나 그물감과 밧줄은 뜬, 발돌과 달리 형상이 정해져 있지 않고 외력에 의해 모양이 쉽게 바뀌게 되므로 예인 시 작용하는 힘에 의해 그 형상이 변하게 되며, 그에 따라 항력과 양력도 달라진다.

#### 수치해석

활어 이송용 예인 가두리는 수중 유연 구조물로 이러한 구조물의 운동 방정식은 다음과 같이 시간에 대한 2차 비선형 상미분 방정식의 형태로 표현되며, 본 연구에서는 긴 시간 간격에서도 비교적 안정적인 계산이 가능한 룬지-쿠타 (Runge-Kutta)법을 사용하여 해석하였다.

$$m\ddot{\mathbf{q}}(t) + c\dot{\mathbf{q}}(t)^2 + k\mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (9)$$

여기서,  $\mathbf{q}(t)$ 는 시간의 변화에 따른 질점의 위치,  $\dot{\mathbf{q}}(t)$ 는 속도,  $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ 는 가속도를 나타내며,  $m$ 은 질점의 질량,  $c$ 는 감쇠계수 (항력계수),  $k$ 는 스프링의 탄성계수,  $\mathbf{F}(t)$ 는 항력을 제외한 외력이다.

#### 가두리 내부 용적 계산 방법

가두리 내부 용적 변화를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 가두리를 36개의 직육면체로 분할하고, 분할된 직육면체의 용적은 스칼라 삼중적 (Scalar Triple Product)을

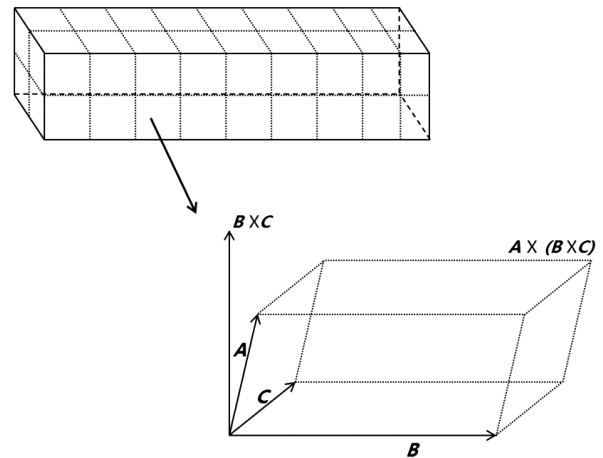


Fig. 5. Geometric partition for the calculation of inside volume of the cage.

사용하여 구하였다. 이 분할된 직육면체의 각각의 용적을 합하여 가두리 전체의 용적을 구하였으며, 가두리 용적 감소율은 유속이 0 m/s일 때의 용적을 100%로 하여 계산하였다.

**활어 이송용 예인 가두리 시뮬레이션**

활어 이송용 예인 가두리는 Fig. 6과 같이 어구 설계프로그램 (SimuCage, MPSL, Korea)을 사용하여 실물 크기로 설계하였다. 실물 시뮬레이션에서는 모형 가두리와 달리 가두리 상부에 원형 뜰만 부착되어 있다.

가두리 그물은 총 2,831개의 질점으로 구성되어 있으며, 수직 전개력을 발생하기 위해 뜰과 체인이 부착된 곳의 질점에는 각각의 부력과 침강력을 부여하였다. 가두리 양쪽에 2개씩 부착한 카이트는 각각 66개의 질점으로 구성되어 있다. 카이트의 각각의 질점들은 항력계수, 양력계수, 질점 하나당 면적 값의 속성을 지니고 있다 (Fig. 7). 가두리의 수평 전개력을 비교하기 위해 부착한 카이트는 항력계수 0.2, 질점 하나당 면적 0.27m<sup>2</sup>를 가지며, 네가지 양력계수 (0.1, 0.3, 0.5, 0.8)를 부여하여 카이트 양력을 네가지로 하였다.

설계한 가두리는 형상 변화와 저항을 측정하기 위하여 예인줄을 부착하고, 각각의 예인줄을 하나로 모았으

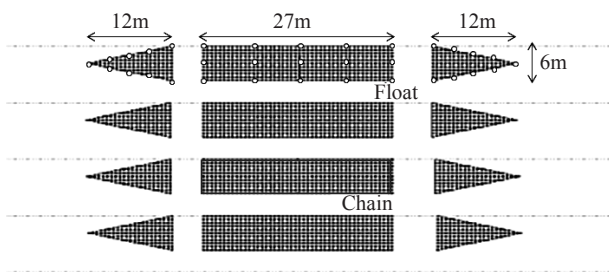


Fig. 6. Drawing of the towing cage using a computer tool.

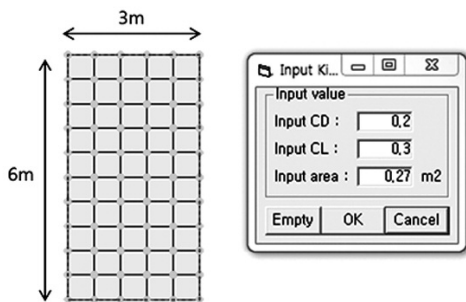


Fig. 7. Drawing of the kite.

며 (Fig. 8), 예인줄은 예인 시 가두리 시스템의 안정성을 높이기 위하여 수심 2 m에 위치하도록 한 뒤 저항을 측정하였다.

모형실험과 시뮬레이션에서 설계한 예인 가두리의 그물감, 예인줄, 카이트 등의 사양을 Table 2에, 부력, 침강력, 예인 속도, 카이트 양력 등의 시뮬레이션 조건을 Table 3에 나타내었다.

본 시뮬레이션에서 예인 속도를 입력하면 실제 해상에서 가두리를 선박이 예인하는 상황이 만들어진다. 예인 속도는 0.5~1.5 m/s (1.0~3.0 knot) 범위에서 0.5 m/s (1.0 knot) 씩 총 3단계로 변화를 주었다. 카이트 각도와 조류에 따른 활어 이송용 예인 가두리 시스템의 형상 변화와 예인줄의 저항 변화를 비교하기 위해 상기의 조건으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 3차원 그래픽 프로그램으로 그 결과를 가시화 하였으며, 계산 시간 간격은 0.0001초였다.

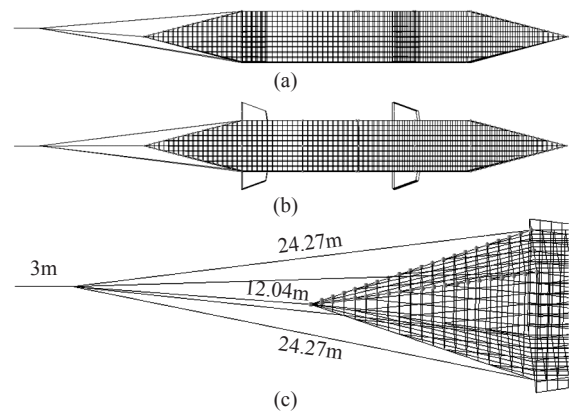


Fig. 8. The shapes of the towing cage ( (a)Side view, (b)Top view, (c)Arrangement of the towing rope).

Table 2. Specifications of the model and simulation towing cage

Item	Specification	
	Model	Simulation
Net		
Size (m)	1.35 × 0.3 × 0.3	27 × 6 × 6
Material	PA(Nylon)	PA(Nylon)
Diameter (mm)	0.5	10
Mesh type	Square	Square
Length of bar (mm)	6	120
Kite		
Size (m)	0.15 × 0.3	3 × 6
Towing rope		
Material	Dyneema	Dyneema
Diameter (mm)	1.8	36

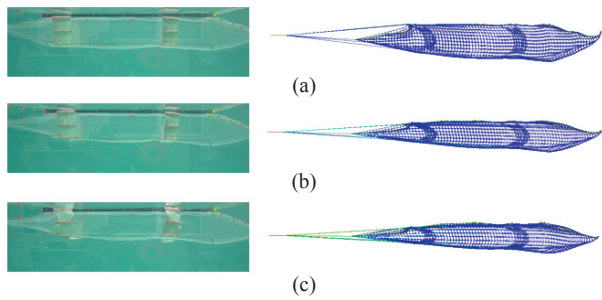
**Table 3. Simulation test matrix**

Parameter	Condition		
	0.5	1.0	1.5
Buoyancy (kN)	4.9	6.3	7.0
Sinking force (kN)	2.1	2.4	3.1
Towing speed (m/s)	0.5	1.0	1.5
Lift force of the kite (kN)	1.9	5.6	9.3

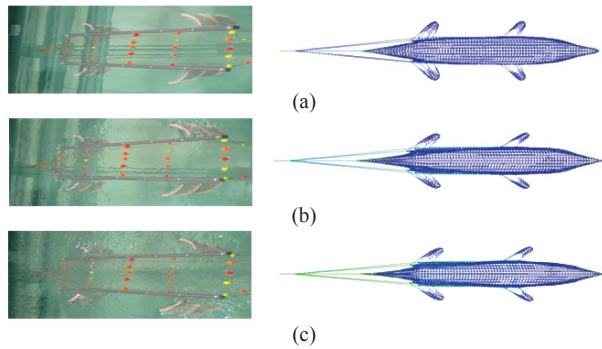
**결 과**

**모형실험과 시뮬레이션을 통한 가두리의 형상 비교**

예인 속도에 따른 형상 변화를 살펴보면, 0.5~1.5 m/s



**Fig. 9. Deformation of the side shapes of the towing cage with changing towing speeds (Left: Model cage, Right: Simulation cage, (a) 0.5 m/s, (b) 1.0 m/s, (c) 1.5 m/s).**



**Fig. 10. Deformation of the top shapes of the towing cage with changing towing speeds (Left: Model cage, Right: Simulation cage, (a) 0.5 m/s, (b) 1.0 m/s, (c) 1.5 m/s).**

**Table 5. Variation of inside volume of the cage with changing towing speeds**

	Towing speeds (m/s)		Inside volume (m <sup>3</sup> )	Inside volume reduction ratio (%)
	0.5	1.0		
Model cage	0.5		742	10.2
	1.0		659	20.2
	1.5		595	28.0
Simulation cage	0.5		763	7.7
	1.0		617	25.3
	1.5		483	41.5

로 예인 속도가 빨라짐에 따라 가두리가 부상하면서 수직 전개가 축소되는 현상을 확인할 수 있었으며, 가두리의 전면이 중앙부보다 많이 부상하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 9). 예인 속도에 따른 가두리의 수직 전개 정도는 1.5 m/s에서 0.5 m/s일 때보다 46%정도 감소되었다. 그러나 이때, 수평 전개 정도는 카이트에서 발생하는 양력도 증가하므로 동일하게 유지하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 10).

**예인 속도에 따른 가두리 저항**

Table 4는 모형실험과 시뮬레이션을 통한 가두리의 저항을 나타낸 것이다. 모형실험을 통해 측정된 저항은 실물 저항으로 환산하여 분석하였으며, 예인 속도가 빨라질수록 예인줄에 작용하는 가두리 저항값이 증가하는 경향을 보였고, 0.5 m/s와 1.0 m/s 예인 속도에서는 모형실험보다 시뮬레이션에서의 저항값이 약간 컸다. 이는 모형 가두리에 폼과 PVC파이프를 상부에 배치함으로써 가두리의 전개 성능이 좋고, 물빠짐이 양호해져서 저항이 작게 측정된 것으로 판단된다.

**Table 4. The variation of tension of towing rope with changing towing speeds**

	Towing speeds (m/s)		Tension (kN)
	0.5	1.0	
Model cage	0.5		6.9
	1.0		30.0
	1.5		87.2
Simulation cage	0.5		11.2
	1.0		41.6
	1.5		87.0

**예인 속도에 따른 용적 변화**

예인 속도 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s에서 가두리 용적과 내부 용적 감소율을 Table 5에 나타내었다. 예인 속도가 빨라질수록 가두리 내부 용적이 감소하였으며, 예인 속도 1.0 m/s에서 가두리 내부 용적 감소율은 모형실험과 시뮬

레이션에서 각각 20.2%, 25.3%를 나타내었다. 예인 속도 1.5 m/s에서는 가두리 내부 용적 감소율의 차이가 크게 발생하였는데, 시뮬레이션에서는 가두리 하부의 부상하는 정도가 커짐으로 인해 수직 전개가 더 많이 감소하여 내부 용적 감소율이 더 크게 측정된 것으로 판단된다.

시뮬레이션을 통한 가두리 성능 해석

전개력에 따른 용적 변화

앞의 모형실험과 시뮬레이션의 비교를 통하여 시뮬레이션의 실용적인 적용가능성을 입증하였으므로, 여기서는 가두리의 수직 및 수평 전개력과 예인 속도에 따른 가두리 내부 용적 감소율을 분석하여 적절한 수직 및 수평 전개력을 추정하고자 한다.

예인 속도 1.0 m/s, 수평 전개력을 5.6 kN으로 고정하고, 수직 전개력을 7.4 kN에서 9.5 kN까지 변경하였을 때 가두리 용적과 용적 감소율을 Table 6에 나타내었다. Table 7에는 수직 전개력을 8.7 kN으로 고정하고, 수평 전개력을 1.9 kN에서 14.8 kN까지 변경시켰을 때 대한 용적 감소율을 나타내었다. 여기서 수직 전개력은 부력과 침강력을 합한 값이며, 수평 전개력은 수평 방향에 작용하는 양력의 합을 말한다.

Fig. 11은 수직 전개력과 수평 전개력에 대한 용적 감소율을 MATLAB 프로그램을 이용하여 3차원 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 11의 3차원 그래프에서 가두리 내부 용적 감소율이 최소가 되는 지점에서의 전개력이 최적의 수직, 수평 전개력을 나타낸다.

Table 6. Variation of inside volume of the cage with changing vertical spreading force (1.0 m/s, horizontal spreading force 5.6 kN)

Vertical spreading force (kN)	Inside volume (m <sup>3</sup> )	Inside volume reduction ratio (%)
7.4	498	39.7
8.3	484	41.4
8.7	617	25.3
9.4	519	37.2
9.5	617	25.4

Table 7. Variation of inside volume of the cage with changing horizontal spreading force (1.0 m/s, vertical spreading force 8.7 kN)

Horizontal spreading force (kN)	Inside volume (m <sup>3</sup> )	Inside volume reduction ratio (%)
1.9	495	40.1
5.6	617	25.3
9.3	613	25.8
14.8	584	29.4

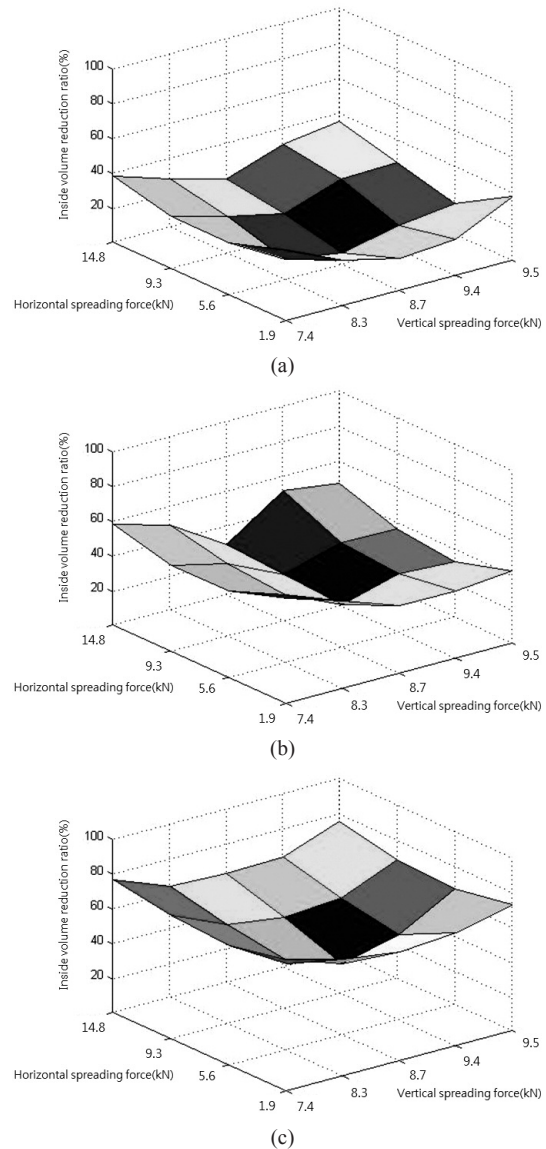


Fig. 11. Change of inside volume reduction ratio of the cage with changing vertical spreading force and horizontal spreading force ( (a) 0.5 m/s, (b) 1.0 m/s, (c) 1.5 m/s).

가두리 저항에 따른 용적 변화

Fig. 12는 시뮬레이션을 통하여 수직 전개력과 수평 전개력을 합한 총 전개력과 저항에 대한 가두리 용적 감소율을 MATLAB 프로그램을 이용하여 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 용적 감소율을 분석한 결과, 총 전개력이 14.2 kN이고, 예인 속도 0.5 m/s, 저항 11.2 kN인 경우, 용적 감소율이 7.7%, 예인 속도 1.0 m/s, 저항 41.6 kN인 경우, 용적 감소율은 25.3%, 예인 속도 1.5m/s, 저항 87.0 kN인 경우, 용적 감소율은 41.5%로 나타났다.

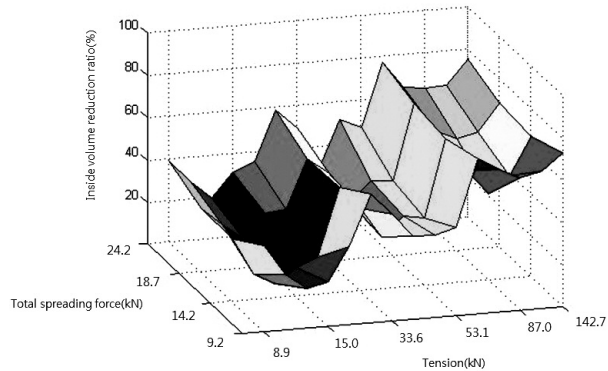


Fig. 12. Change of inside volume reduction ratio of the cage with changing total spreading force and tension.

## 고찰

지금까지는 원거리 어장에서 어획된 활어를 축양장까지 이송할 경우 예인 가능한 가두리를 어장까지 예인하여 간 후, 어획을 기다려서 활어를 가두리에 넣은 후 다시 예인하여 축양장까지 이동하는 방법을 사용하였다. 이러한 이송 방법은 가두리가 대형 구조물이므로 이동에 시간과 경비가 많이 들어서 효율적이지 못하다는 지적이 있었다. 본 연구에서 개발하고자 하는 이송용 가두리는 어장까지 이동시에는 선박 위에 적재하고, 어장에 도착하여 간단한 조작을 거쳐 이송용 가두리를 조립한 다음 어획물을 넣은 후 즉시 예인하여 축양장까지 이송할 수 있고, 운반 속도도 기존의 가두리보다 빠른 속도로 가능한 것이 특징이다.

본 연구에서 해석을 시도한 활어 이송용 예인 가두리는 강체 구조물을 포함하지 않으면서도 직육면체의 구조를 유지시키기 위해서 가두리 상단과 하단에 뜰과 체인을 부착하여 수직 전개를 시키고, 가두리 양쪽에 카이트를 달아 수평 전개를 시켰다. 또한 예인 시 발생하는 저항을 최소화하기 위해 예인 방향으로 뿔 형태의 그물을 부착하였다.

가두리의 전개 성능은 수직 및 수평 전개력의 크기에 영향을 받았으며, 전개력이 클수록 저항도 증가하였다. 예인 속도 1.0 m/s에서 수직 전개력이 8.7 kN인 경우 가두리 용적 감소율은 약 25%를 나타내었고, 수직 전개력이 클수록 가두리가 부상하는 현상이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 수직 전개력이 너무 큰 경우에는 가두리의 수직 전개 거리는 커지지만 오히려 수평 전개 거리가 감소하여 가두리 내부 용적이 감소하였고, 가

두리 저항도 증가하였다. 또한, 예인 속도 1.0 m/s에서 수평 전개력이 5.6 kN일 경우 용적 감소율이 약 25%를 나타내었으며, 수평 전개력이 작을 경우와 지나치게 클 경우에는 용적 감소율이 증가하였다. 또한, 수평 전개력이 커짐에 따라 발생하는 저항도 증가하였다.

Kreiberg and Solmie (1987)가 수행한 예인 가능 가두리에 의한 연구에서는 예인 속도 0.3~0.8 m/s의 범위에서 Netpen 방법이 Seine 방법보다 어류의 생존율이 양호한 것으로 나타났고, 예인 속도에 따른 내부 용적의 변화는 제시되지 않았다. 국내 연구진에 의한 연구(NFRDI, 2012)에서, PE파이프로 가두리 형상을 만든 이송용 가두리의 경우 예인 속도인 0.5 m/s일 때, 가두리 내부 용적 감소율이 16%로 나타났고, 고속 이동이 가능한 1.0 m/s의 예인 속도에서는 가두리 내부 용적 감소율이 56%로 나타났다.

본 연구에서는 고속 이동이 가능한 예인 속도 1.0 m/s에서도 가두리 내부 용적 감소율이 30% 이하가 될 수 있도록 목표를 세웠다. 예인 시 발생하는 저항을 고려하여 수직 전개력과 수평 전개력의 변화를 주어 최적의 예인 조건을 도출해보면, 예인 속도 1.0 m/s일 때, 수직 전개력은 8.7 kN, 수평 전개력은 5.6 kN 정도로 추정되었다.

활어 이송용 예인 가두리를 이용하면 어획 후 생존율이 낮은 어종을 조업 어장에서 양식장 혹은 육상까지 활어 운반이 가능하므로, 동일한 어획노력량에 비해 경제적 이득을 높일 수 있고, 치어 확보에도 활용될 것으로 기대된다. 따라서 활어 이송용 예인 가두리는 예인 시 발생하는 저항에 따른 유류 소모량 증가 및 가두리 형상 변화로 인한 어류의 사망 등 어업손실을 최소화 할 수 있도록 설계하여야 한다. 특히, 예인 가두리 설계시 수직 및 수평 전개력의 크기를 결정하는 것이 중요하기 때문에 수직 전개력을 위해 공기 팽창식 튜브에 대한 연구, 수평 전개력을 위해 카이트 양력에 대한 연구 등 예인 시 발생하는 문제점을 극복하고, 휴대성을 높일 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

## 결론

최근 수산물 소비의 증가와 함께 활어 상태로 접하기 어려운 어종에 대한 수요도 증가하여, 외해 및 연근해에서 어획된 고등어나 참치와 같은 어획 후 생존율이 낮은 어종의 활어 운반을 위한 기술적 요구가 발생하고 있다.

본 연구에서는 활어 이송용 예인 가두리를 개발함에



있어, 모형실험과 시뮬레이션을 통하여 활어 이송용 예인 가두리의 내부 용적 감소율을 수직 · 수평 전개력 크기 및 예인 속도에 따라 분석하였다.

활어 이송용 예인 가두리는 예인 시 가두리 전면 상부는 가라앉고, 하부는 부상하는 현상이 나타났다. 가두리 전면 상부가 가라앉는 것을 최소화하기 위해 부력의 변화를 주었고, 하부가 부상하는 것을 최소화하기 위해 침강력의 변화를 주어 수직 전개력을 발생시켰다. 수평 전개력을 발생시키기 위해서 가두리 좌우에 카이트를 부착하였다.

예인 가두리는 수직 및 수평 전개력의 크기에 따라 가두리 용적 감소율과 저항이 변화하였다. 적절한 예인 가두리의 수직 및 수평 전개력의 크기는 예인 속도에 따른 저항의 증가를 고려하여 선택하여야 하며, 예인 속도 1.0 m/s일 때, 가두리 용적 감소율을 30% 이하로 허용할 경우, 수직 전개력은 8.7 kN, 수평 전개력은 5.6 kN 정도로 추정되었다.

## 사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2013년:C-D-2013-0317)에 의하여 연구되었음.

## References

- Cha BJ. 2003. Numerical simulation on the dynamic characteristics of the trawl system. Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Korea. pp.90
- FAO. 2012. The state of world fisheries and aquaculture, 3 – 100.
- Goudey CA. 2009. Practical aspects of offshore aquaculture system design. [www.was.org/ documents/MeetingPresentations/AA2009/AA2009\\_0825.pdf](http://www.was.org/documents/MeetingPresentations/AA2009/AA2009_0825.pdf). Presentation at the World Aquaculture Society, Aquaculture America 2009.
- Hosseini SA, Lee CW, Kim HS, Lee JH and Lee GH. 2011. The sinking performance of the tuna purse seine gear with large-meshed panels using numerical method. *Fish Sci* 77, 503 – 520. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12562-011-0371-6>)
- Kim HY, Lee CW, Shin GK, Kim HS, Cha BJ and Lee GH. 2007. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification. *Fish Res* 88 (1-3), 109 – 119. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2007.08.007>)
- Kreiberg H, Solmie A. 1987. A production-scale towable netpen for efficient high-volume transport of pacific herring: Design and comparative performance. *Aquacult Eng* 6, 289 – 299. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0144-8609\(87\)90024-0](http://dx.doi.org/10.1016/0144-8609(87)90024-0))
- Lee CW, Kim YB, Lee GH, Choe MY, Lee MK and Koo KY. 2008. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Eng* 35, 1521-1532. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.06.009>)
- Lee JH, Lee CW and Cha BJ. 2005. Dynamic simulation of tuna longline gear using numerical methods. *Fish Sci* 71, 1287 – 1294. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-2906.2005.01095.x>)
- Malcolm B. 2008. Cage aquaculture 3rd edition. John and Sons. Fishing news books, Oxford ox2 oel, England, 149 – 164.
- NFRDI. 2012. Development of blue fin tuna transport system, 8 – 21.
- Rottiers, Donald V. 1991. Towable cage for studies of smoltification in Atlantic salmon. *The Progressive Fish-Culturist* 53 (2), 124 – 127. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8640\(1991\)053<0124:TCFSOS>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8640(1991)053<0124:TCFSOS>2.3.CO;2))

2014. 4.7 Received

2014. 5.21 Revised

2014. 5.22 Accept