

수치모델링을 활용한 해파리 차단 그물의 안정성 해석

이건호*

국립수산과학원 수산공학과 연구원

Structural stability analysis of jellyfish blocking net using numerical modeling

Gun-Ho LEE*

*Researcher, Division of Fisheries Engineering Research, National Institute of Fisheries Science
Busan 46083, Korea*

Damages by jellyfish are occurring frequently around the world. Among them, accidents caused by jellyfish stings are serious enough to cause death. So we designed a jellyfish blocking net and analyzed its stability to prevent sting caused by jellyfish entering the beach. To this end, the dynamic behavior of the jellyfish blocking net according to the current speed (0.25-1.0 m/s) and the net type (50, 100 and 150 mm) on the upper part of the blocking net was modeled using the mass spring model. As a result of simulations for the model, the horizontal tension (horizontal component of the mooring tension) of the mooring line increased with the decrease in the mesh size on the upper part of the blocking net at all current speeds, but exceeded the holding force at high tides faster than 0.5 m/s and exceeded the holding force at all current speeds at low tide. Therefore, the jellyfish blocking nets showed poor stability overall. The depth of the float line had a little difference according to the upper mesh size and increased linearly proportional to the current speed. However, the float line sank too much to block the incoming jellyfish. These analysis results helped us find ways to improve the stability of the jellyfish blocking net, such as adjusting the length of the mooring line and improving the holding power. Therefore, it is expected that this technology will be applied us various underwater structures to discover the weaknesses of the structures and contribute to increasing the stability in the future.

Keywords: Jellyfish net, Jellyfish sting, Jellyfish blocking, Mass spring, Numerical model

서론

세계적으로 해파리에 의한 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 어구에 걸리거나 갇히는 해파리는 어획물을 손상시켜 어획 손실을 야기하고 해안가에 떠밀려온 해파리는 물속에 노출돼있는 사람의 신체에 접촉하여 독성에 의한 인명 사고를 유발한다(Park et al., 2015a). 해수를

냉각수로 이용하는 발전소의 경우 해파리가 냉각수 취수구를 막아서 발전소 가동을 멈추게 함으로써 경제적 손실을 발생시킨다(Kim et al., 2014).

이러한 해파리에 의한 피해를 줄이기 위한 연구들은 해파리가 성장하기 전에 해파리 유생들의 서식지를 찾아 고압수 분사를 통해 폴립을 제거하는 연구(Kim,

*Corresponding author: ghlee94@korea.kr, Tel: +82-51-720-2592, Fax: +82-51-720-2586

2018), 자루그물 형태의 어구 끝에 예리한 철사 등을 격자 형태로 설치하여 자루그물 안에 들어온 해파리를 절단하는 연구(Park et al., 2015b), 발전소 취수구를 막는 해파리 제거를 위해 취수구로 들어오는 해파리를 부양시킨 후 고속 회전하는 분쇄장치로 제거하는 연구(KORDI, 2005) 등이 있었다.

해파리에 의한 여러 피해 중에서도 해파리에 의한 쓰임 사고는 인명을 해칠 정도로 그 피해가 심각하다(Donno et al., 2009; Fenner et al., 2010; Dong et al., 2010; Choudhary et al., 2019). 우리나라에서도 해수욕장에서 물놀이 중 해파리 쓰임으로 여아가 사망한 사례가 보고되고 있다(Park et al., 2015a). 이처럼 해수욕장으로 유입된 해파리가 인명 사고를 유발하는 것을 막기 위해 최근 해변에서 일정 거리가 되는 지점에 해파리 차단용 그물을 설치하는 방법이 시도되고 있다(Park et al., 2015b).

해파리 차단 그물은 밀물 때 해안쪽으로 유입되는 해파리를 원천적으로 차단하는 방법이다. 해파리 차단 그물의 원리는 매우 단순하지만 해파리 차단 성능과 시설의 안정성은 상호 보완적인 관계에 있어 설계가 단순하지 않다. 왜냐하면 해파리 차단 성능을 높이려고 뜰줄의 부력을 무작정 높이거나 그물코의 크기를 지나치게 줄이면 유수 저항도 증가하여 차단 시설이 붕괴될 가능성이 있기 때문이다. 따라서 설치 환경에 따른 해파리 차단 그물의 안정

성 해석이 반드시 수반되어야 한다. 해파리 차단 그물과 관련하여 Park et al. (2015a)은 해운대 해수욕장 해파리 차단 그물을 설계하고 안정성을 해석한 바 있다. 또한 Vasslideset et al. (2018)은 해수욕장에 출몰하는 해파리(Sea nettle) 및 기타 지역 동물군에 대한 그물 차단 그물의 영향을 평가한 바 있다. 그러나 이러한 연구들 중에서 역학적 거동 해석 방법을 통해 해파리 차단 그물의 안정성을 분석한 연구는 찾기 어렵다. 역학적 거동 해석 기법은 구조물에 외력이 가해질 때 시간 변화에 따른 구조물의 동적 응답을 파악할 수 있어 다양한 수중 구조물의 안정성 해석에 적용되고 있다(Lee et al., 2008; Lee et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 다양한 해석 기법 중 그물과 같은 유연체의 거동 해석에 유리한 질량 스프링 모델을 이용하여 유속 및 그물 망목 구성 방법에 따른 해파리 차단 그물의 동적 거동을 모델링하고 다양한 조건에 따른 구조물의 파주력과 유체 외력과의 관계를 비교함으로써 해파리 차단 그물의 안정성을 분석하였다.

재료 및 방법

해파리 차단 그물의 규격

해파리 차단 그물의 총 길이는 1,400 m, 높이는 6 m였고, 사용된 망목의 재질은 PE, 크기는 150 mm, 굵기는 2.3 mm, 가로 성형률은 70%였다. 차단 그물의 상부와

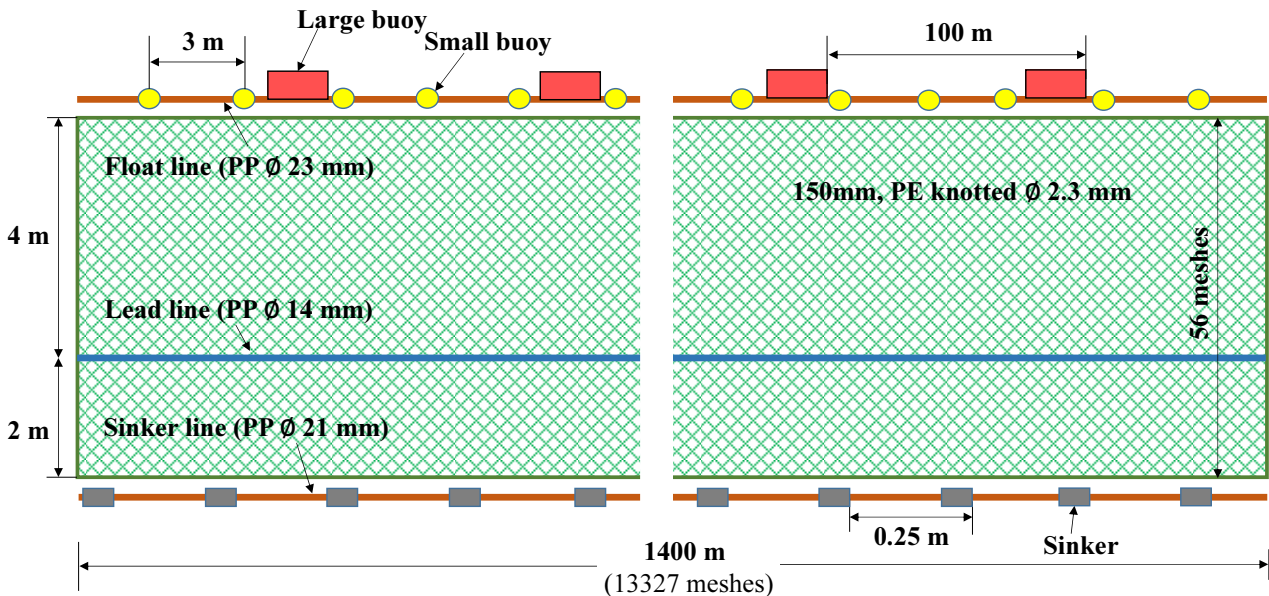


Fig. 1. Schematic diagram of jellyfish blocking net.

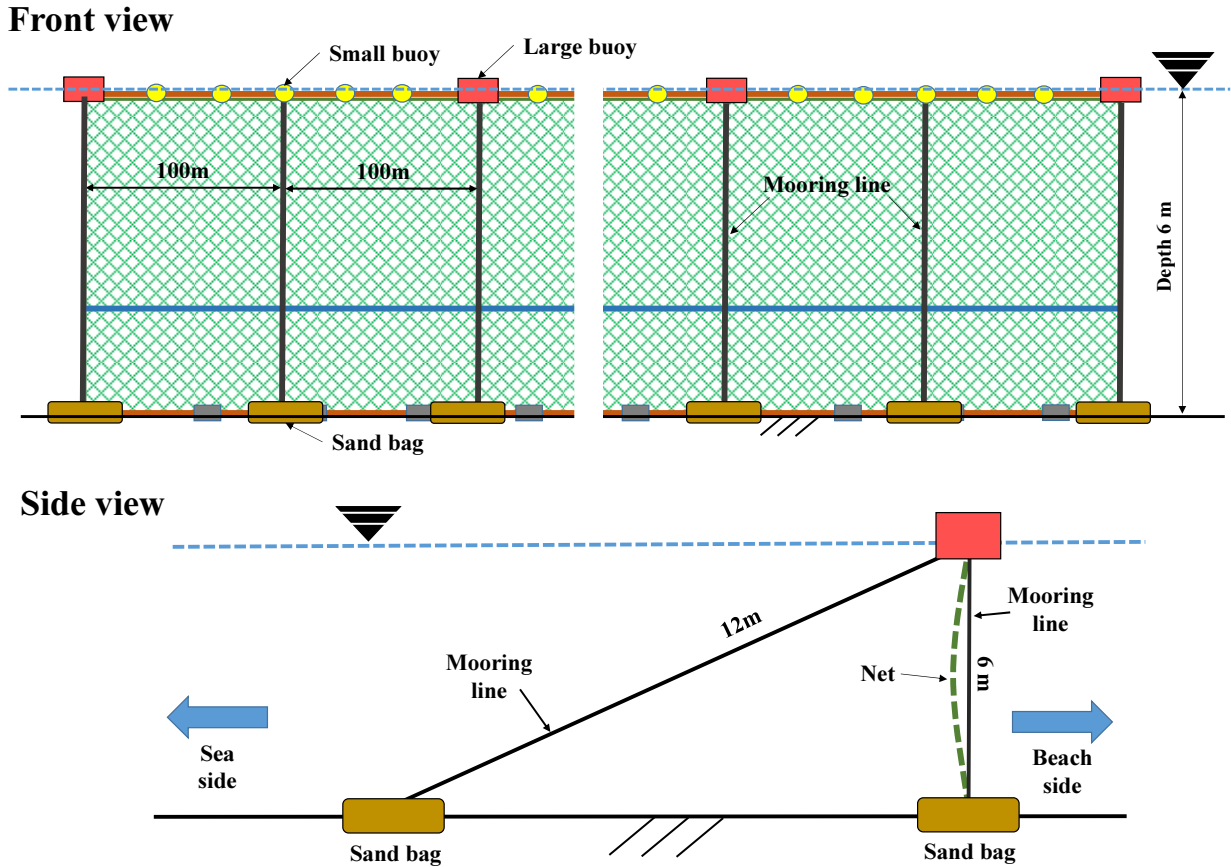


Fig. 2. Mooring system of jellyfish blocking net.

하부에는 각각 뜬줄(PP, $\varnothing 24$ mm)과 발줄(PP, $\varnothing 21$ mm)이 부착되고 일정 간격으로 부이와 침자가 부착되었다. 또한 발줄에서 2 m 높이에 연심로프(PP lead, $\varnothing 14$ mm)를 부착하였다. 뜬줄에는 두 종류의 부이가 부착되었는데 소형 부이(구형, PE, $\varnothing 200$ mm, 부력 3.54 kgf)가 3 m간격으로 부착되었고, 대형 부이(원통형, 스티로폼, $\varnothing 300 \times L600$ mm, 부력 184 kgf)가 100 m간격으로 부착되었다. 발줄에는 원통형 납추($\varnothing 10 \times L30$ mm)가 0.25 m간격으로 설치되었다. 차단 그물에 사용된 망지, 로프 및 부속구들의 규격 Fig. 1에 나타냈다.

그물을 지지하기 위해 명줄을 Fig. 2와 같이 설치하였다. 해안 쪽에 설치되는 명줄(12 m, PP, $\varnothing 34$ mm)은 100 m 간격으로 설치하였고 바다 쪽에 설치되는 명줄(6 m, PP, $\varnothing 34$ mm)도 100 m간격으로 설치하였다. 명줄은 모래 자루로 고정하였는데 육지 쪽에 설치되는 명 한 개의 공기중 중량은 1200 kgf, 바다 쪽에 설치되는 명

한 개의 공기중 중량은 600 kgf였다. 해파리 차단 그물은 밀물 때와는 달리 썰물 때는 그물 하부가 날려서 흐름과 나란하게 되는 구조로 제작되었다. 즉, 밀물 때 유입되는 해파리들은 차단하고 썰물 때는 자유롭게 빠져나가게 하는 구조로 밀물 때는 육지 쪽에 수직으로 설치된 명줄에 의해 그물이 벽 모양을 형성하고 썰물 때는 그물 아래 쪽이 날리면서 해파리 등이 바닷가 쪽으로 빠져나가게 설계되었다. 따라서 육지 쪽에 설치되는 명줄은 그 길이가 수심과 같도록 설계되었다.

수치 모델링 및 계산 방법

해파리 차단 그물의 동적 거동을 모델화하기 위해 Lee et al. (2008)가 제안한 모델링 기법을 적용하였다. 이 모델에서는 그물, 로프, 부속구 등의 구성 요소들을 유한 개의 질점과 스프링으로 모델화한다. 질점은 질량, 부피, 면적 등을 가지며, 유체 저항 등을 포함한 모든

물리력은 각 질점에만 작용한다. 각 질점에 외력이 가해져 질점의 운동 상태가 변하게 되면 질점을 연결하는 스프링에 탄성력이 작용하고 이 힘이 연쇄적으로 작용하여 시스템 전체의 운동 상태를 변화시킨다. 질점의 운동을 기술하기 위해 식 (1)과 같이 뉴턴의 운동 제2법칙에 따른 방정식을 사용하였다.

$$(m + m_a)\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_I + \mathbf{F}_E \quad (1)$$

식 (1)에서 $\ddot{\mathbf{q}}$ 는 질점의 가속도, m 과 m_a 는 각각 질점의 질량과 부가질량을 나타낸다. m 과 m_a 의 합은 질점이 유체속에서 운동할 때 형성되는 가상 질량을 나타낸다. 질점은 내력 F_I 와 외력 F_E 의 지배를 받는데 여기서 내력은 스프링이 인장될 때 작용하는 복원 탄성력으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{F}_I = \mathbf{n}_r k_e A \frac{(|\mathbf{r}| - l)}{l} \quad (2)$$

식 (2)에서 \mathbf{n}_r 은 내력이 작용하는 방향을 나타내는 단위벡터, k_e 는 재료의 탄성계수, A 는 재료의 유효 단면적, l 은 스프링의 처음 길이, \mathbf{r} 은 계산 중인 질점과 연결된 다른 질점의 상대 위치 벡터를 나타낸다. 외력(F_E)은 식 (3)과 같이 질점의 수중 무게에 의한 부력 또는 침강력 (F_B)과 질점과 유체와의 상대적인 운동에 의해 발생하는 유체 저항 즉, 항력(F_D)과 양력(F_L)으로 구성된다. 식 (4)와 (5)에서 C_d 는 항력계수, C_l 은 양력계수, ρ 는 유체의 밀도, S 는 질점의 투영면적을 나타낸다. \mathbf{n}_D 는 \mathbf{V} 의 단위 벡터에 방향만 반대로 취한 벡터로 항력이 작용하는 방향을 나타낸다. \mathbf{n}_L 은 양력의 작용 방향을 나타내는 단위 벡터로 식 (6)과 같이 구할 수 있다(Lee et al., 2008). 항력과 양력 계수는 Lee et al. (2015)의 연구를 참조하였다. \mathbf{V} 는 질점의 운동 속도(\mathbf{V}_m)와 조류의 속도(\mathbf{V}_c)에 대한 합력 벡터이다(식 (7)).

$$\mathbf{F}_E = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_B \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_D = 0.5 C_d \rho S V^2 \mathbf{n}_D \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_L = 0.5 C_l \rho S V^2 \mathbf{n}_L \quad (5)$$

$$\mathbf{n}_L = \frac{(\mathbf{V} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{V}}{|(\mathbf{V} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{V}|} \quad (6)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_m - \mathbf{V}_c \quad (7)$$

식 (2)~(7)에서 계산된 값들을 식 (1)에 대입한 후 가속도에 관한 식으로 정리하여 이 값을 시간 변화에 따라 룬지쿠타 4차 방법으로 수치 적분함으로써 질점의 속도 및 위치를 구하였다. Fig. 3은 질량 스프링 모델에서 질점에 작용하는 힘을 모형화 한 것이다.

최종적으로 구해진 질점의 위치들은 3차원 벡터이므로 Visual studio 6.0 프로그램과 그래픽 라이브러리인 OpenGL을 이용하여 3차원 가상 공간에 점으로 표현하였고 스프링은 가상의 선으로 표현하였다. 수치 적분 간격은 0.0005초 였고, 총 계산 시간은 예비 시뮬레이션을 통해 해파리 차단 그물의 거동이 안정화되는 시점을 기준으로 정하였다. 시스템의 계산 속도를 높이기 위해 질점 근사를 사용하였다(Lee et al., 2008).

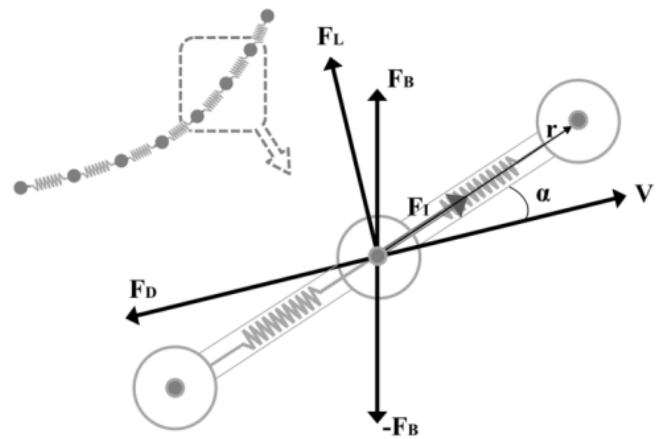


Fig. 3. A schematic diagram showing the forces acting on a mass point in the mass spring model (Lee et al., 2020).

명의 파주력 계산

물체의 파주력을 구하는 식은 기본적으로 식 (8)과 같이 표현된다. 여기서 k 는 실험계수로 물체와 지면 사이의 마찰계수, W_w 는 수중 물체의 무게를 나타낸다. 식 (8)의 결과는 명줄이 바닥과 평행할 때의 마찰력 즉, 최대 파주력이고 명줄과 바닥이 이루는 각도를 고려한 명의 실제 파주력은 식 (9)와 같이 계산된다(Fridman, 1986). 여기서 θ 는 명줄이 해저면과 이루는 각도를 나타낸다. 마찰계수는 모래로 된 해저에 놓인 모래 주머니를 가정하여 0.76을 적용하였다(Fridman, 1986).

$$F_h = k W_w \quad (8)$$

$$F_h = \frac{k W_w}{1 + k \tan \theta} \quad (9)$$

명의 파주력은 해저와 나란한 방향으로 작용하므로 이에 대한 반작용에 해당하는 힘은 명줄 장력의 수평 성분이고 이것은 식 (10)과 같이 표현된다. T는 명줄의 장력 벡터를 나타낸다.

$$F_r = T \cos \theta \quad (10)$$

모래의 수중 무게는 식 (11)과 같이 구하였다. 이 때 물의 비중(ρ_w)을 1.0, 모래의 비중(ρ_b)을 1.6으로 가정하였으므로 명의 공기중(W_a) 중량에 0.375배 한 값이 모래 명의 수중 중량이 된다.

$$W_w = W_a \left(\frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_b} \right) \quad (11)$$

시뮬레이션 조건

해파리 차단 그물의 안정성은 해수욕장을 드나드는 밀물 및 썰물의 유속과 차단 그물의 특성에 따른 유수 저항, 그리고 계류 시스템의 파주력으로 결정되므로 시뮬레이션은 그물 구성, 조류의 속력 및 방향을 달리하여 실시하고 각 조건마다 명줄의 장력 및 파주력을 확인하여 그 차이를 비교하였다. 또한 해파리 차단 그물은 해안가에 밀려오는 해파리를 차단하는 것이 목적이므로 뜬줄의 수심이 해파리 차단 여부와 관계가 있으므로 뜬줄의 수심도 함께 비교하였다.

그물 구성 조건은 3가지로 망목 크기가 150 mm인 망지로 차단 그물 전체를 구성하고 상부의 높이 0~1m 부분을 구성하는 부분만 망목크기가 50, 100, 150 mm로 달라지게 하였다. 조류 속력 조건은 향후 연구의 대상인 해운대 해수욕장의 최대 유속 0.72 m/s를 고려하여 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 m/s로 정하였고, 조류의 방향 조건은 조류가 바다에서 육지방향으로 흐르는 밀물 방향과 그 반대 방향인 썰물 방향이었다. 따라서 3가지 그물 구성 조건과 8가지 조류 조건을 고려하여 총 24가지 조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션에서 각 조건별 명줄 장력 및 명의 파주력

확인 및 비교를 위해 명은 초기 위치에 고정되는 것으로 가정하였고 해파리 차단 그물이 설치되는 수심은 6 m였다.

결과 및 고찰

명줄의 장력

망지의 구성, 조류의 속력 및 방향에 따른 명줄의 평균 장력을 Fig. 4에 나타냈다. 이 중 Fig. 4a는 명줄이 대형 부이(부력 184 kgf)에 연결된 경우, Fig. 4b는 소형 부이(3.54 kgf)에 연결된 경우를 나타낸다. 망목 구성에 따른 명줄의 평균 장력(이하 명줄 장력)은 조류의 방향(밀물과 썰물)과 상관없이 차단 그물 상부 망지의 망목 크기가 감소할수록 증가하였는데 망목크기가 150 mm에서 100 mm로 감소할 때 보다 100 mm에서 50 mm로 감소할 때가 장력의 증가 폭이 컸다. 예를 들어 상부 망지의 망목크기가 150 mm일 때의 명줄 장력을 기준값으로 정했을 때, 밀물 조건에서 명줄이 대형 부이에 연결된 경우 상부 망지에 100 mm 망목을 사용했을 때의 명줄 장력은 기준값과 비교해 유속 평균 18.1 kgf 증가하였고 50 mm를 사용했을 때는 57.5 kgf 증가하였다. 명줄이 소형 부이에 연결된 경우 상부 망지에 100 mm 망목을 사용했을 때는 명줄 장력이 5.1 kgf 증가하였고 50 mm를 사용했을 때는 71.6 kgf 증가하였다.

썰물 조건에서는 명줄이 대형 부이에 연결된 경우 상부 망지에 100 mm 망목을 사용했을 때 명줄 장력은 유속 평균 1.9 kgf 감소하였고 50 mm를 사용했을 때는 19.5 kgf 증가하였다. 명줄이 소형 부이에 연결된 경우 상부 망지에 100 mm 망목을 사용했을 때는 명줄 장력이 7.3 kgf 감소하였고 50 mm를 사용했을 때는 24.0 kgf 증가하였다. 이와 관련된 자세한 결과를 Table 1에 나타냈다.

또한 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 100 mm 망지에서는 유속이 증가하여도 기준값에 대한 상대적인 장력의 증가량이 비교적 일정하였으나 50 mm 망지에서는 유속 증가에 따라 거의 선형적으로 상승하였다. 따라서 그물 상부 망지의 망목 크기가 감소할수록 해파리 차단 그물의 안정성도 감소하며 이러한 경향은 설치 지역의 유속이 빠를수록 더 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 망목의 크기가 줄어들수록 공극률 증가에 따른 저항도 증가하므로 망목 크기 감소에 따른 영향은 더욱 커질 것으로 생각된다(Kim, 2012; Lee et al., 2021).

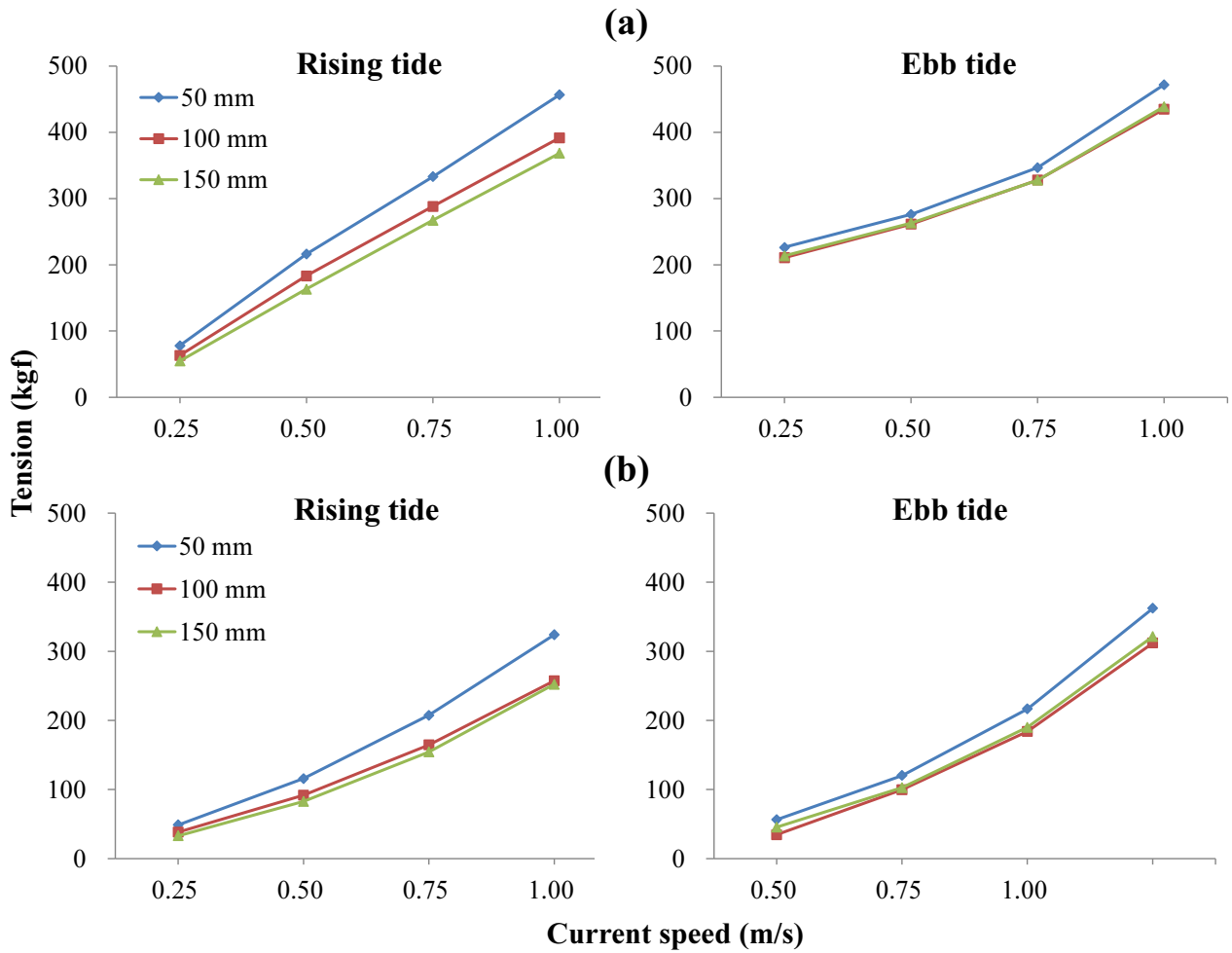


Fig. 4. Mooring line tension by the upper mesh size on the net and current speed (a: connected to a large buoy, b: connected to a small buoy).

조류의 속력에 따른 멍줄의 장력은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 대부분의 조건에서 유속 증가에 따라 지수적으로 증가하였다. 해파리 차단 그물은 구조상 밀물 때는 수직으로 계류된 멍줄에 걸려서 장벽 형태가 되는 반면 썰물 때는 그물 상부가 멍줄에 고정된 채 하부가 흐름을

Table 1. The increase in the average of the mooring tension by current speed according to the upper mesh size on the jellyfish blocking net and current direction

Mesh size change	Unit: kgf			
	Rising tide		Ebb tide	
	Large buoy	Small buoy	Large buoy	Small buoy
150→100 mm	18.1	7.4	-1.9	-7.3
150→50 mm	57.5	43.4	19.5	24.0

따라 날리는 자망과 유사한 구조가 된다. 전자와 유사한 조건에 대한 연구를 Jin et al. (2019)의 연구에서 확인할 수 있다. 이 연구에서는 저층 자망의 뜰줄과 발줄에 연결된 계류줄의 유속별 장력을 역학적 시뮬레이션 기법을 이용하여 계산하였다. 이 연구에서는 뜰줄에 걸리는 장력이 유속 증가(0.2~1.0 m/s)에 따라 지수적으로 증가하는 것을 확인하였는데 이 결과는 밀물 때 소형 부이에 연결된 멍줄의 장력 패턴과 일치한다(Fig. 4b 좌측). 그러나 같은 밀물 조건에서 대형 부이와 연결된 멍줄의 장력은 이 연구와 다른 패턴을 보였다. 이러한 차이는 뜰줄을 구성하는 부이의 부력과 연관이 있는 것으로 보인다. 앞서 제시한 Jin et al. (2019)의 연구에서는 뜰줄 전체에 부력이 1 kgf 미만인 소형 부이를 사용하였는데

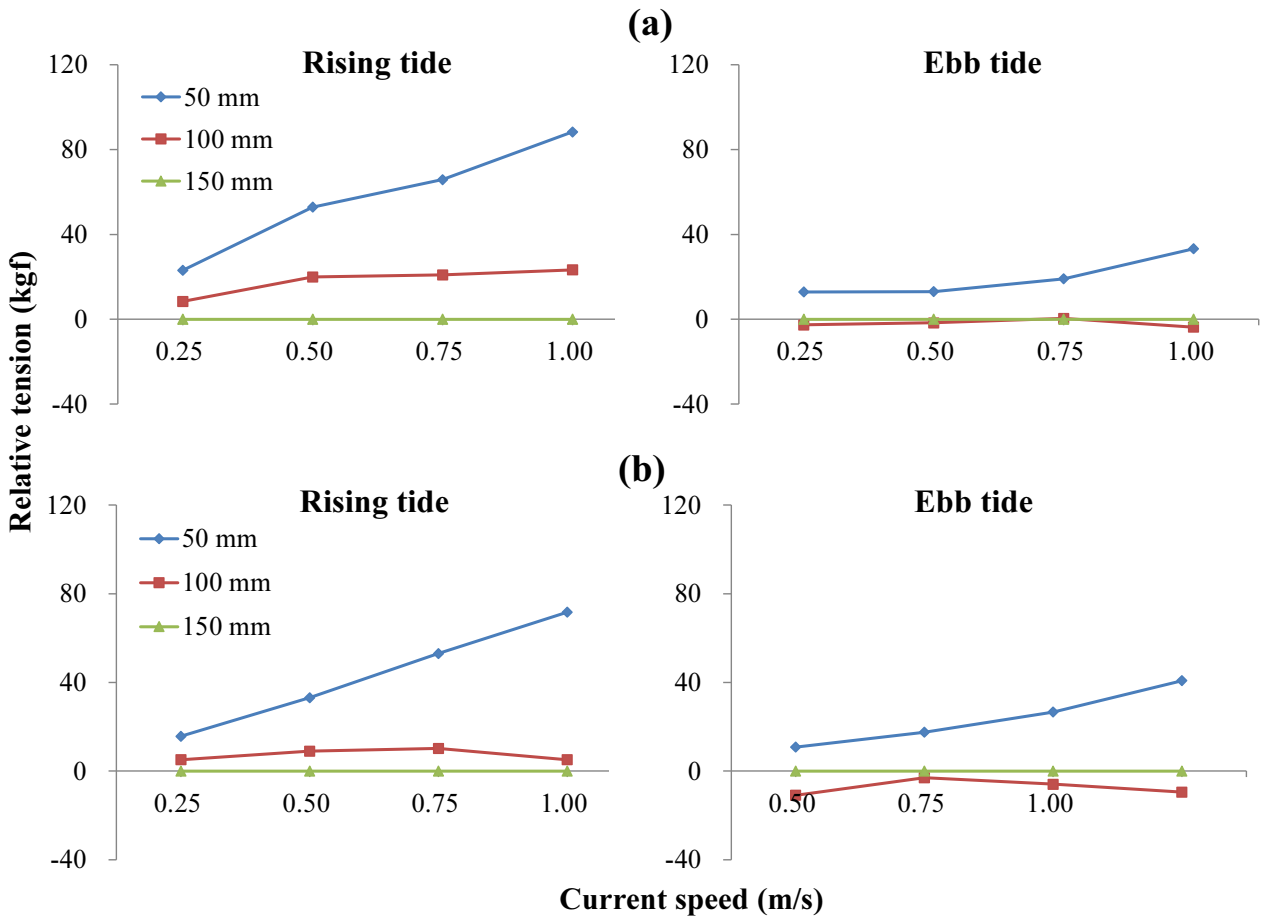


Fig. 5. Relative increase in mooring tension by the upper mesh size of the jellyfish blocking net (a: connected to a large buoy, b: connected to a small buoy).

마찬가지로 본 연구에서도 이 연구와 장력 패턴이 유사했던 경우에는 부력이 낮은 소형 부이(부력 3.54 kgf)를 사용하였다. 이와는 달리 유속 증가에 따라 명줄 장력이 선형적으로 증가했던 경우에는 부력이 상대적으로 큰 대형 부이(부력 184 kgf)가 연결되어 있었다(Fig. 4a 좌측). 따라서 명줄에 연결된 부이의 종류(부력)가 명줄의 장력에 미치는 영향을 파악하기 위해 유속 및 부이의 종류에 따른 부이의 평균 수심을 조사하였다(Fig. 6). 그 결과, 명줄에 대형 부이가 연결된 경우 유속 증가에 따른 부이의 수심이 양의 계수를 가진 거둬제곱 형태로 증가하였고, 소형 부이가 연결된 경우 음의 계수를 가진 거둬제곱 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 부이의 수심이 증가하여 그물의 높이가 낮아지면 흐름에 대한 영각이 감소하면서 유체 저항도 감소한다(Kim,

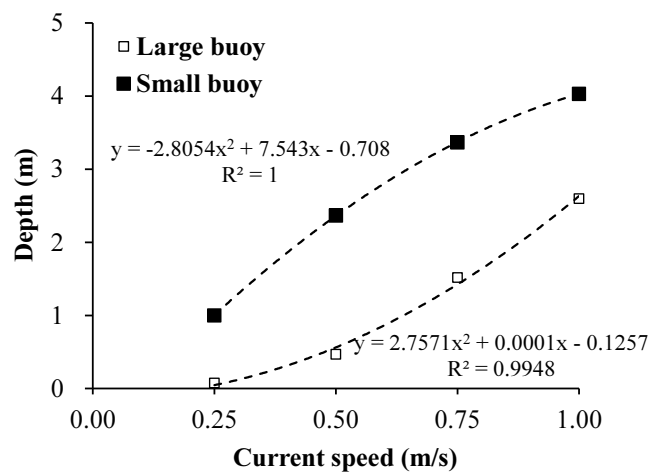


Fig. 6. The depth of the buoy by the current speed and the type of buoy connected to the mooring line.

2012). 따라서 소형 부이를 사용한 기존 연구(Jin et al., 2019)에서의 장력 패턴이 지수적일 때 유속 증가에 따른 수심 증가율이 이보다 상대적으로 높은 대형 부이를 사용한 경우에는 뜬줄의 장력 패턴이 선형에 가깝게 도출될 수 있을 것으로 생각된다.

후자와 유사한 조건에 대한 연구로는 Lee et al. (2015)의 연구를 살펴볼 수 있다. 이 연구에서는 어구 유실 과정의 구멍을 위해 유속에 따른 자망 어구 닻줄의 계류 장력을 수치모델링 기법을 통해 확인하였다. 그 결과, 자망 어구의 뜬줄을 지지하는 닻줄의 장력이 유속 증가에 따라 지수적으로 증가하는 경향을 확인하였는데 이러한 경향은 썰물 때 해파리 차단 그물의 뜬줄 장력의 패턴과 유사하다.

뜸줄의 수심

해파리 차단 그물은 해안가에 밀려오는 해파리를 차

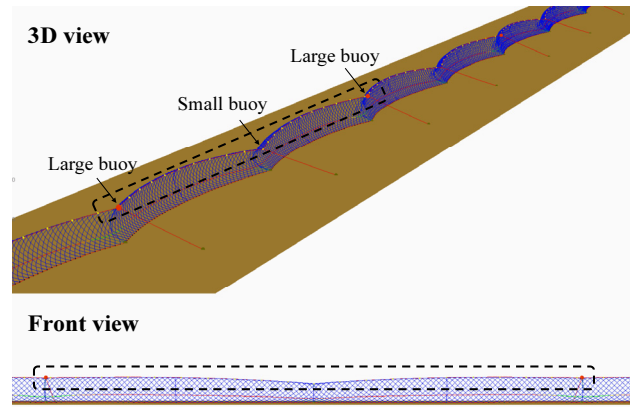


Fig. 7. The part of the float line depth measurement in the jellyfish blocking net (see dotted line).

단하는 것이 목적이고 뜬줄의 수심이 해파리 차단 여부와 관계가 있으므로 뜬줄의 수심 분석은 밀물 조건에 대해서만 실시하였다. 뜬줄의 수심은 Fig. 7에 점선으로

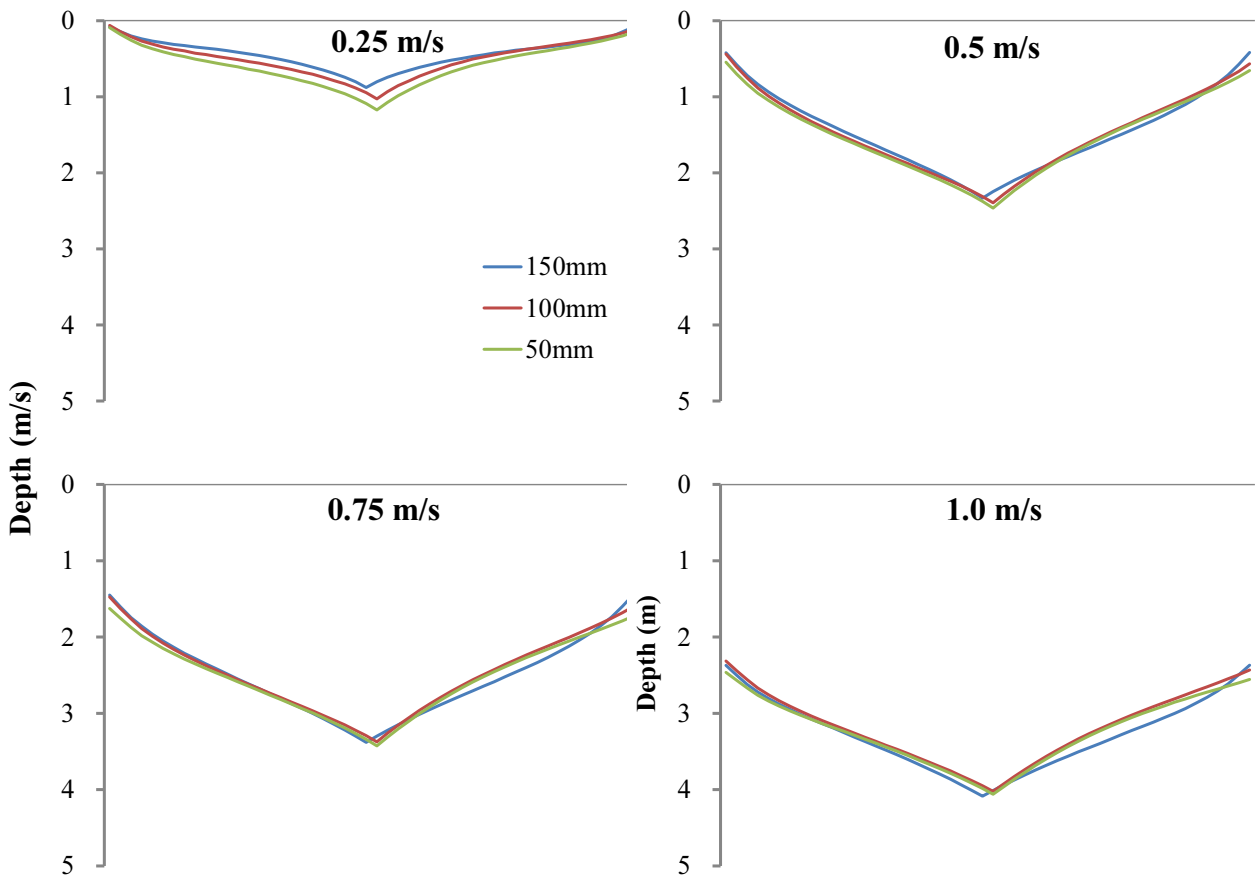


Fig. 8. The depth of the float line by the upper mesh size on the blocking net under rising tide.

표현한 구간 즉, 대형 부이 사이의 뜰줄을 하나의 세트로 정한 후 길이 방향으로 이동하면서 세트 단위로 수심 값들을 반복 추출한 후 세트 평균을 구해서 유속별 상부 망지의 망목 크기에 따른 뜰줄의 평균 수심을 Fig. 8과 같이 나타냈다.

그 결과, 상부 망지의 망목 크기에 따른 수심 차이는 거의 없었고, 세트의 가운데 지점에 가까울수록 뜰줄 수심이 증가하였다. 세트의 가운데 지점이 가장 많이 가라앉는 이유는 이 지점에 멍줄이 연결되어 있지만 부력이 약한 소형 부이가 부착되어 있기 때문이다. 유속별 상부망지의 망목 크기에 따른 뜰줄의 평균 수심에서 상부 망지의 망목 크기가 150, 100 및 50 mm일 때 뜰줄의 평균 수심은 1.92, 1.90 및 1.96 m였으며, 최대 수심은 2.67, 2.62 및 2.70 m로 망목 크기에 따른 뜰줄의 평균 수심 및 최대 수심은 거의 차이가 없었다.

조류의 속력 증가에 따른 뜰줄 수심은 선형적으로 증가하였다. 유속별 상부망지의 망목 크기에 따른 뜰줄의 평균 수심에서 유속이 0.25, 0.50, 0.75 및 1.0 m/s일 때 뜰줄의 평균 수심은 0.51, 1.49, 2.49 및 3.23 m였으며, 최대 수심은 0.97, 2.34, 3.34 및 4.01 m로 뜰줄의 평균 수심과 최대 수심 둘 다 유속에 증가에 거의 선형적으로 비례하였다.

우리나라 여름철 해수욕장에 자주 출몰하는 해파리는 노무라 입깃 해파리와 보름달 물해파리로(Part et al., 2015a) 이 시기 출현이 빈번한 노무라 입깃 해파리의 크기(우산 직경 약 0.5 m, Park et al., 2010)와 보름달 물해파리의 크기(우산직경 약 0.16 m, Kang and Park, 2003)를 고려하면 본 연구에서 대상으로 정한 해파리 차단 그물의 뜰줄 수심은 너무 낮아서 해파리 차단에 적합하지 않다. 따라서 해파리 차단망 뜰줄의 부력 보완이 필요하다. 부력 보완을 위해 기본적으로는 뜰줄 전체의 부력 증가도 필요하지만 멍줄과 연결된 뜰줄에 대형 부이를 부착하는 것이 효과가 크다. 멍줄에 차단 그물의 저항이 집중되기 때문이다. 그리고 공간이 허용된다면 멍줄의 길이를 가능한 한 길게 해야 한다. 뜰줄이 가라앉는 것은 멍줄 장력의 수직 성분에 의한 것으로 이 값은 멍줄이 짧을수록 증가하기 때문이다. 현재의 멍줄 길이는 수심의 2배(12 m)인데 이럴 때 멍줄 장력의 50%가 뜰줄 침하력으로 작용한다. 멍줄 길이를 수심의 4배로 늘리면 이 비율을 25%까지 줄일 수 있다.

멍의 파주력과 멍줄 장력 비교

밀물 조건에서 차단 그물 상부 망목의 크기와 조류 속력에 따른 멍의 파주력과 멍줄 장력의 수평 성분(이하

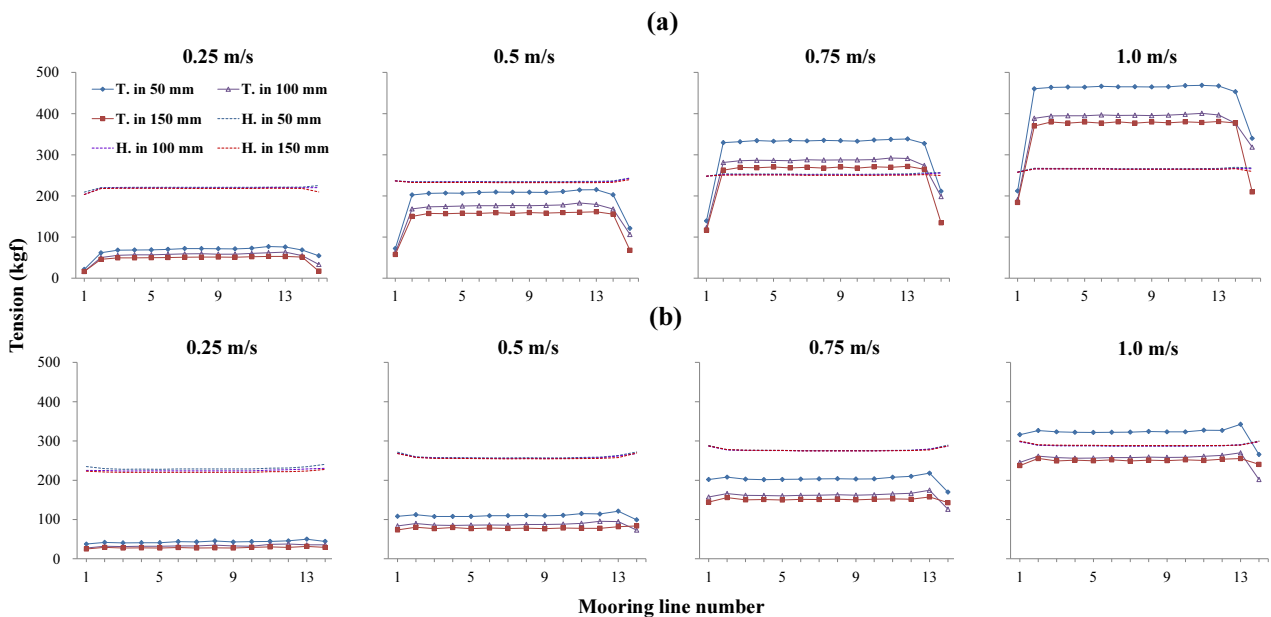


Fig. 9. The holding power of the sand bag and horizontal tension of the mooring line by the upper mesh size and current speed under rising tide (a: connected to a large buoy, b: connected to a small buoy).

수평장력)을 Fig. 9에 나타냈다. 여기서 Fig. 9a는 명줄이 대형 부이에 연결된 경우이고, Fig. 9b는 소형 부이에 연결된 경우를 나타낸다. 명줄의 파주력은 명의 물리적 특성과 저질 특성, 명줄 길이에 대한 설치 수심의 비에 의해 결정된다. 본 시뮬레이션에서 명의 물리적 특성과 저질 특성은 동일하고 뜰줄의 수심은 상부 망지의 망목 크기 차이에도 불구하고 거의 차이가 없었으므로 망목 크기에 따른 파주력은 거의 일정하게 나타났다. 반면 망목크기 감소에 따라 명줄 장력은 증가하였기 때문에 차단 그물의 상대적인 안정성은 감소하였다. 특히 망목 크기가 50 mm인 조건에서는 유속 증가에 따라 장력이 큰 폭으로 증가하였으므로 상대적인 안정성도 큰 폭으로 감소하였다.

조류의 속력에 따른 명줄의 수평 장력은 밀물 조건에서 명줄이 대형 부이에 연결된 경우 유속 0.25와 0.5 m/s에서는 파주력을 넘지 않았지만 그 이상의 유속에서는 파주력을 초과하여 명이 끌리는 것으로 나타났다(Fig. 9a). 명줄이 소형 부이에 연결된 경우는 유속 1.0 m/s에서 차단 그물 상부 망지의 망목 크기가 50 mm인 경우를 제외하고는 모든 조건에서 파주력을 넘지 않았다(Fig. 9b).

이처럼 소형 부이에 연결된 명줄의 수평장력이 대부분의 조건에서 파주력을 초과하지는 않았지만 약한 부력으로 인해 뜰줄의 침하 정도가 크기 때문에 대형 부이에 준하는 부력재의 추가가 필요하다. 그러나 부력을 보완하더라도 부력이 높아지면 명줄 장력도 증가하여 대형 부이와 연결된 명줄과 동일한 상태가 될 것이므로 결국은 대형 부이와 연결된 명줄에 초점을 맞춰서 개선 방안을 도출하는 것이 필요하다. 앞서 제시한 바와 같이 대형 부이에 연결된 명줄은 0.5 m/s 이하의 유속에서는 명줄의 수평장력이 파주력보다 작아 명줄 끌림은 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 하지만 해상 구조물 설치 시 적용하는 안전 계수와 실제 해수욕장의 유속 조건 (0.72 m/s)을 고려하면 파주력을 적어도 현재 값의 3배 이상으로 높여야 한다(해운대 해수욕장의 7월 말 최대 유속은 약 0.72 m/s임, Park et al. (2015a)). 가장 일반적인 보완 방법은 명줄 길이 조정을 통한 방법이다. 명줄 길이가 늘어나면 파주력은 증가하는데 예를 들면 명줄 길이가 현재 12 m에서 18 m가 되면 파주력이 1.13배가 되고 24 m가 되면 1.2배가 된다(Table 2). 명줄 길이 조정 외에도 명의 중량을 늘리거나 명의 종류를 바꿔 마찰

Table 2. The holding power of the sand bag by the length of the mooring line

Sand bag weight (kgf)	Rope length (m)	Depth (m)	Holding power (kgf)	Holding power ratio
1200	12	6	237.7	1.00
1200	18	6	269.6	1.13
1200	24	6	285.9	1.20

계수를 늘리는 방법도 있다. 그러나 안전율까지를 고려한 가장 효과적인 방법은 명 대신 닻을 사용하는 것이다. 닻의 파주 계수를 7로 가정할 경우 모래 명의 10% 중량의 철 닻만 사용해도 파주력을 현재 파주력의 약 3배까지 향상시킬 수 있다.

썰물 조건에서 차단 그물 상부 망목의 크기와 조류 속력에 따른 명의 파주력과 명줄 장력의 수평 성분을 Fig. 10에 나타냈다. 밀물 때와 마찬가지로 Fig. 10a는 명줄이 대형 부이에 연결된 경우이고, Fig. 10b는 소형 부이에 연결된 경우를 나타낸다. 썰물 조건일 때 명줄의 수평 장력은 명줄이 대형 부이에 연결된 경우 모든 유속 조건에서 파주력을 초과하여 명이 끌리는 것으로 나타났고(Fig. 10a), 명줄이 소형 부이에 연결된 경우는 수평 장력이 유속 0.25와 0.5 m/s에서는 파주력을 넘지 않았지만 그 이상의 유속에서는 파주력을 초과하여 명이 끌리는 것으로 나타나(Fig. 10b) 밀물 조건일 때와 비교해 해파리 차단 그물의 안정성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 해파리가 해안가로 밀려오는 것을 방지하기 위해 명줄을 수직으로 세워서 설치한 것에 기인한다. 명줄이 수직으로 설치될 경우 명줄 길이에 대한 수심의 비가 기하급수적으로 증가하여 파주력이 급격히 감소한다(Fridman, 1986). 따라서 썰물 때 차단 그물을 지지하는 방법을 개선할 필요가 있다. Park et al. (2015a)의 경우 해파리 차단 그물이 날리는 것을 방지하기 위해 발줄 부분에 연심로프를 부착하고 그물 지지를 위한 명줄은 밀물 및 썰물 방향에 대해 각각 사선으로 설치하였다. 이러한 방법은 차단 그물의 설치 안정성을 높일 수 있으나 연심로프의 중량이 충분하지 않을 경우 그물이 뜨면서 해파리가 발줄 아래로 유입될 수 있다. 또한 발줄의 날림을 줄이고자 연심로프 등의 중량을 과도하게 늘리면 뜰줄이 가라앉아 뜰줄 위쪽으로 해파리가 유입될 수 있다. 따라서 기존에 수직으로 세운 명줄은 그대로 두고 해안가 방향으로 충분한 길이의 추가적인 명줄을

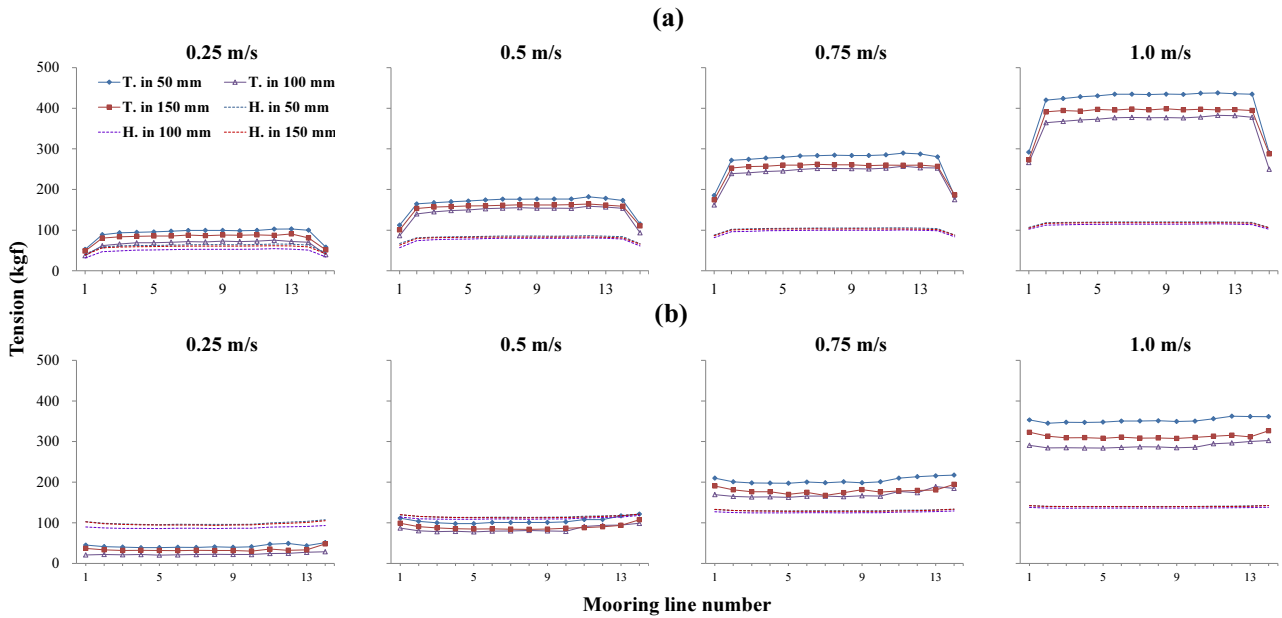


Fig. 10. The holding power of the sand bag and horizontal tension of the mooring line by the upper mesh size and current speed under ebb tide (a: connected to a large buoy, b: connected to a small buoy).

설치하는 것이 해파리 차단망의 안정성을 높이고 해파리도 효과적으로 차단하는 방법이라 생각된다.

현재까지의 해석 결과를 종합하면 본 연구에서 설계한 해파리 차단 그물은 안전 계수 2 이상을 고려할 때 유수저항에 비해 명줄의 파주력이 부족할 뿐만아니라 뜰줄의 부력도 부족하여 해파리가 유입될 가능성이 있다. 이를 보완하기 위해서는 해안 및 바다쪽으로 설치된 명줄의 길이를 각각 수심의 3배 이상으로 늘려야 한다. 이를 통해 명줄의 파주력과 뜰줄 부력을 동시에 향상하는 효과를 얻을 수 있다. 그리고 명줄은 그물의 저항이 집중되는 곳이므로 명줄마다 대형 부이를 부착해서 뜰줄 침하를 막을 필요가 있다. 또한 시설의 안전을까지를 고려한 안정적인 계류 시스템을 구성하기 위해서는 현재의 모래 명줄 이용한 파주 시스템은 한계가 있으므로 명줄 모두 닻으로 변경하여 파주력을 최소 3배 이상 높여야 한다.

본 연구는 해파리 차단 그물의 안정성 해석에 관한 위한 기초 연구로써 인적 요소인 그물에만 초점을 두었고 자연적인 요소인 해파리는 고려되어 있지 않다. 실제로 해파리가 그물에 걸렸을 때 차단 그물의 안정성이 어떻게 달라지는지는 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구 결과가 현장에 적절히 반영되기 위해서는 차단 그물에

해파리가 걸린 상황을 가정한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다.

결론

해수욕장의 해파리 유입을 막기 위한 해파리 차단 그물을 설계하고 질량 스프링 모델 및 수치 적분 기법을 이용하여 그물 구성 방법, 조류의 방향과 속력에 따른 시설의 안정성 및 해파리 차단 성능을 분석한 결과는 다음과 같았다.

그물 구성에 따른 명줄의 장력은 조류의 방향과 상관 없이 차단 그물 상부 망지의 망목 크기가 감소할수록 증가하였으며 유속이 빠를수록 그 폭도 증가하였다. 그리고 조류의 속력 증가에 따라서는 대부분의 조건에서 지수적으로 증가하였다. 뜰줄의 수심은 상부 망지의 망목 크기에 따른 차이는 거의 없었고 조류의 속력 증가에 따라서는 선형적으로 증가하였으나 침하 정도(최소 유속 0.25 m/s에서 평균 수심 0.51 m, 최대 수심 0.97 m)가 커서 우리나라 여름철 남해안에서 발견되는 해파리(우산직경 0.5 m 이하)를 차단하는데는 적절하지 않았다. 명줄의 수평장력은 모든 유속에서 망목크기 감소에 따라 증가하였다. 조류의 속력에 따른 명줄의 수평 장력은 밀물 조건에서 명줄이 대형 부이에 연결된 경우 유속

0.5 m/s 이하에서는 파주력을 넘지 않았지만 그 이상의 유속에서는 파주력을 초과하여 멍이 끌리는 것으로 나타났다. 멍줄을 수직으로 세워서 설치한 썰물 조건에서는 모든 유속에서 파주력을 초과하여 전반적으로 안정성이 부족한 것으로 판단되었다. 해석 결과에 따른 안정성 확보 방안으로는 멍줄 길이를 각각 수심의 3배 이상 늘려 멍의 파주력과 뜰줄 부력을 높이는 방안과 멍줄마다 대형 부이를 부착하여 뜰줄 침하를 줄이는 방안, 모래 멍을 모두 닦으로 변경하여 파주력을 3배 이상 높이는 방안이 제시되었다. 이처럼 수치 모델링을 활용한 수중 구조물의 거동 해석 기술은 비교적 적은 비용과 노력으로 시설물의 안정성을 파악하고 단점을 보완할 수 있어 향후 다양한 수중 구조물의 특성을 이해하고 시설의 안정성을 높이는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2022년도 국립수산과학원 수산과학연구소 사업(R2022047)과 2014년 산업통상자원부 국민편익증진 개발사업(과제명: 유영해양생물 해파리 대량발생에 따른 대국민 피해 저감 방안 개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 연구(국민편익증진개발사업) 책임자로서 해파리 차단망 설계도를 제공해 주신 박성욱님께 감사의 말씀을 전합니다.

References

- Choudhary I, Hwang DH, Lee H, Yoon WD, Chae J, Han CH, Yum S, Kang C and Kim E. 2019. Proteomic analysis of novel components of *Nemopilema nomurai* jellyfish venom: deciphering the mode of action. *Toxins* 11, 153. <https://doi.org/10.3390/toxins11030153>.
- Dong Z, Liu D and Keesing JK. 2010. Jellyfish blooms in China: dominant species, causes and consequences. *Journal Marine Pollution Bulletin* 60, 954-963. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.04.022>.
- Donno A, Idolo A and Bagordo F. 2009. Epidemiology of jellyfish stings reported to summer health centres in the Salento peninsula (Italy). *Contact Dermatitis* 60, 330-335. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.2009.01561.x>.
- Fenner PJ, AM, MD (London), FACTM, FRCGP, Lippmann J, OAM, BSc DipEd and Gershwin L-A. 2010. Fatal and nonfatal severe jellyfish stings in Thai waters, *Journal of Travel Medicine* 17, 133-138. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8305.2009.00390.x>.
- Fridman AL. 1986. Calculations for fishing gear designs. Carrothers PJG, ed. *Fishing News Books*, England, 70-72.
- Jin C, Kim H, Kim M-H and Kim K. 2019. Monitoring-system development for a bottom-set gillnet through time-domain dynamic simulations. *Applied Sciences* 9, 1210. <https://doi.org/10.3390/app9061210>.
- Kang YS and Park MS. 2003. Occurrence and food ingestion of the moon jellyfish (Scyphozoa: Ulmariidae: *Aurelia aurita*) in the southern coast of Korea in summer. *Journal of the Korean Society of Oceanography* 8, 199-202.
- Kim BH. 2018. Distribution and removal effects of polyps of the moon jellyfish in Korean coastal area. Department of Fisheries Science, Kunsan National University, Korea, 182.
- Kim DY, Lee JS and Kim DH. 2014. A study on direction of industrial utilization for jellyfish in Korea. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 26, 587-596. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2014.26.3.587>.
- Kim HJ. 2012. Hydrodynamic coefficients of plane nettings according to attack angle, Reynolds number and solidity ratio. Department of Fisheries Physics, Pukyong National University, Korea, 73.
- KORDI. 2005. Prevention of bio-impingement against power plant intake, KORDI, Ansan, 13-30.
- Lee CW, Kim YB, Lee GH, Choe MY, Lee MW and Koo KY. 2008. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Engineering* 35, 1521-1532. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.06.009>.
- Lee GH, Kim IO, Cha BJ and Jung SJ. 2015. Analysis for gillnet loss in the West Sea using numerical modeling. *Journal of Korean Society Fisheries Technology* 51, 600-613. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.4.600>.
- Lee GH, Cha BJ and Kim HY. 2020. A study on the minimization of mooring load in fish-cage mooring systems with a damping buoy. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 814. <https://doi.org/10.3390/jmse8100814>.
- Lee GH, Kim HY and Song DH. 2021. The opening efficiency difference of guide net in finless porpoise escape device by the type of extension net in stow net. *Journal of the Korean society of Fisheries and Ocean Technology* 57, 271-282. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2021.57.4.271>.
- Park CD, Kim IO, Lee KH, Lee GH and Park SW. 2010. The

performance of a wedge type jellyfish excluder device inserted in a trawl net. *Journal of the Korean society of Fisheries Technology* 46, 302-312. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2010.46.4.302>.

Park S, Lee D, Yang Y, Lee H, Lee K, Hahn M and Lee T. 2015a. Analysis on underwater stability of the jellyfish sting protection net installed in the Haeundae beach. *Journal of the Korean society of Fisheries Technology* 51, 128-135. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.1.128>.

Park S, Lee K, Yoon WD, Lee DG, Kim S, Yang YS and Lee GH. 2015b. A study on the damage reduction strategy against a harmful aquatic organism, jellyfish's

bloom. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 27, 49-62. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.1.49>.

Vasslides JM, Sassano NL and Hales LS. 2018. Assessing the effects of a barrier net on jellyfish and other local fauna at estuarine bathing beaches, *Ocean and Coastal Management* 163, 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.07.012>.

2022. 01. 11 Received

2022. 02. 08 Revised

2022. 02. 15 Accepted