



# Morison 식을 이용한 사단경사형 인공어초의 안정성 평가 및 안정 중량 산정

김민수 · 윤한삼<sup>†</sup>  
부경대학교(학생) · <sup>†</sup>부경대학교(교수)

## Safety Evaluation and Assessment of the Stable Weight of Four-step inclined Artificial Reefs using the Morison Equation

Min-Su KIM · Han-Sam YOON<sup>†</sup>  
Pukyong National University(student) · <sup>†</sup>Pukyong National University(professor)

### Abstract

In this study, we defined the direction(0°, 45°, 90°) of Four-step inclined artificial reef. We used the Morison equation to calculate the forces incident on an artificial reef due to waves acting in the 0°, 45°, and 90° directions as a function of the working surface of the fluid, and then analyzed the stability of the artificial reef. This enables us to predict whether actual reefs in the field will be stable during engineering projects. We proposed a value for the stable weight of the artificial reef considered in this study based on its projection area. The wave forces acting on the artificial reef in the 45° and 90° directions were found to be about 40% larger than those induced by the flow in the 0° direction. Hence, the artificial reef remains stable against flows incident in the 0° direction under high wave conditions, but flows in the 45° and 90° directions cause it to slide in an unstable manner. This result suggests that it is not sufficient to analyze the stability of artificial reefs against forces in the direction of the predominant flows; we must also analyze the forces caused by flows from other directions. This will allow us to be confident that the reef will perform as intended. Also As a result of the stable weight study of the artificial reef the drag coefficient should be accurately determined for economic design.

**Key words :** Artificial reef, Drag coefficient, Projection area, External force, Morison equation, Stability of artificial reef, Stable weight

### I. 서론

인공어초(Artificial Reef)는 연안역의 해저 또는 해중에 지형의 변화를 주기 위하여 인공적으로 설치된 어초를 말하며, 유용수산생물의 집어에 의한 생산력을 증가시키는 중요한 어장 시설이다(Kim, 1995).

최근 Lee et al.(2016)이 우리나라를 비롯한 동

아시아 인공어초 개발 역사와 연구현황을 고찰하고 어초어장의 이용 효율 극대화 및 어초 개발 방향에 대해서 연구하였고, Yoon(2018)은 우리나라 일반어초의 자원조성 효과를 확인하기 위해 시험어초 효과조사 보고서를 분석한 연구 사례가 있다.

또한 인공어초의 시설 효과 개선을 위한 연구로 인공어초의 배치에 따른 후류역과 후류면적,

<sup>†</sup> Corresponding author : 051-629-7375, yoonhans@pknu.ac.kr

어초 주변의 유향특성, 어초의 최적 배치, 어초의 수리학적 안정성, 어초 주변의 곡소세굴 및 어초의 매몰, 침하 등에 대한 세부 연구들이 지속적으로 수행되어 오고 있으며(Jung and Na, 2018; Kim et al., 2016; Lee et al., 2016), Kim et al.(2016)이 후류 체적 선도(wake volume diagram)를 개념을 도입하여 인공어초 후류역을 평가하는 연구를 수행하였다.

인공어초는 일반적으로 재질(콘크리트, 강재, 세라믹 등), 수심(근해용, 연안용), 기능(어류용, 패조류용, 어패류용, 해중립), 구조형태(면, 태)로 분류할 수 있으며, 해중립초의 경우 수심 1~15 m, 패조류용 어초의 경우 5~15 m, 어류용 어초의 경우 15~70 m의 수심에 시설된다.

수심이 얇은 쇄파대에서부터 심해에 이르기까지 다양한 수심에 인공어초가 시설되기 때문에 파랑, 조류 등의 외력에 의해 해역에 시설된 인공어초의 전도(Overturning), 활동(Sliding), 세굴, 매몰 등이 야기되어 본래의 기능을 잃는 경우가 있다(Kim et al., 2009). 즉, 인공어초가 외력 작용에 대해 그 기능을 지속하기 위해서는 기본적으로 파랑 및 조류 등의 유체력에 대해서 평가가 요구된다.

일반적으로 해저에 침설시킨 수중구조물의 안정성은 외력에 의한 양력을 무시할 수 있다고 가정하면, 수립자 속도에 의한 항력(drag force)과 수립자의 가속도에 의한 관성력(inertia force)의 선형적인 결합으로 이루어진 Morison et al.(1950)에 의해 제안된 식으로 계산 할 수 있다.

이론적으로 문제가 남아 있지만 거의 타당한 결과를 주는 것으로 인정되고 있으며(Horikawa, 1979), Ryu and Kim(1994)은 Morison 식을 이용하여 파력의 합리적인 산정법 및 최대파력 산정식을 나타내었고, Woo et al.(2014)은 우리나라에서 개발된 인공어초들의 형태적 분류 및 각 어초 형상별 항력계수( $C_D$ )를 수치모의를 통해 제시하였다.

앞서 기술한 Morison 식에서 어초에 작용하는

유체력은 유체의 밀도가 일정하다고 가정한다면 외력의 합성 유속과 항력계수(drag coefficient) 및 투영 단면적(projection area)만이 변수가 된다. 또한 설계 유속이 일정하다고 가정한다면 오직 항력계수와 투영 단면적만이 변수가 된다(Kim et al., 2009).

따라서 일정한 설계 유속에서 어초에 작용하는 유체력의 작용방향이 달라진다면 유체가 작용하는 면의 항력계수와 투영 단면적이 달라지고, 결과적으로 어초에 작용하는 유체력이 변하게 된다. 즉, 인공어초에 작용하는 유체력의 작용방향에 따라 인공어초의 안정성 평가가 필요하다.

현재 인공어초의 안정성 평가는 유체의 외력이 주로 작용하는 방향에 대해서만 이루어지고 있다. 따라서 유체력이 주로 작용하는 방향뿐만 아니라 다양한 각도에 대해서도 안정성 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 인공어초 실무자가 향후 어초를 개발하고자 할 때, 개발 초기 시점에서 어초의 개략적인 구조적 개념을 바탕으로 구조물의 안정성을 평가할 수 있도록 개발 시스템을 명확히 정립할 필요성이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 인공어초의 방향( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )을 설정하고 인공어초에 유체력 작용 시, Morison 식을 이용하여 유체의 흐름방향 즉, 외력 작용면( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )에 대해 어초에 작용하는 외력을 산정하고 어초의 안정성 검토 결과를 분석하였다. 또한 어초의 투영단면적에 따른 안정 중량을 산정하고 향후 인공어초 개발자가 새롭게 개발되는 인공어초에 대한 안정성을 간편하게 예측할 수 있도록 투영 단면적에 따른 인공어초의 안정 중량 산정식을 제안하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. Morison 방정식과 안전율

인공어초는 해저에 설치된 후, 파랑과 흐름에 의해 활동하거나 전도되어 인공어초의 기능을 상

실할 우려가 있다. 따라서 이에 대한 문제점 해소를 위해 인공어초의 안정성에 대한 이론적 검토가 필요하다. 일반적으로 구조물에 작용하는 유체력은 Morison et al.(1950)에 의해 제안된 식을 적용한 사례가 많으며, 인공어초의 경우 적절한 파력계수의 변화를 통해 실질적으로 타당한 결과를 보이는 것으로 인정되고 있다(Ryu and Kim, 1994). 인공어초에 작용하는 외력은 유체의 유속에 의한 항력(drag force)과 가속도에 의한 관성력(inertia force)의 선형적인 결합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_0 = \frac{C_D A w_0}{2g} u^2 + \frac{C_M V w_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, 제1항은 흐름의 항력(구조물 배후의 소용돌이 등에 의해 생기는 힘), 제2항은 걸보기 관성력(유체 압력경사에 의해 생겨나는 힘과 병행하여 구조물의 존재에 의한 주변 유체가 가속되기 때문에 생기는 힘)을 나타낸다. 또한  $C_D$ 는 항력계수,  $A$ 는 어초의 투영면적,  $w_0$ 는 해수의 단위체적중량,  $g$ 는 중력가속도,  $u$ 는 유속,  $C_M$ 은 질량계수,  $V$ 는 인공어초의 실용적,  $F_0$ 는 인공어초에 작용하는 유체력을 의미한다.

유체력( $F_0$ )의 값을 구하기 위한 설계 유속( $u_0$ )은 파랑에 의한 유속과 흐름에 의한 유속이 모두 고려되어 식(2)와 식(5)로 표현할 수 있다. 여기서,  $u_1$ 은 파랑에 의한 유속,  $u_2$ 는 흐름에 의한 유속이며,  $u_m$ 은 인공어초 설치 수심에서의 수립자의 진폭,  $H$ ,  $L$ ,  $T$ 는 각각 파고, 파장, 주기,  $D$ 는 해저에서 인공어초의 높이,  $h$ 는 수심을 나타낸다 (Jeon et al, 2018).

$$u_0 = u_1 + u_2 = u_m \sin\theta + u_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$u_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2\pi D/L}{\sinh 2\pi h/L} \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta = kx - \omega t = \frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{2\pi}{T} u_m \cos\theta \dots\dots\dots (5)$$

인공어초의 안정조건은 작용 유체력( $F_0$ )에 대해 활동과 전도가 발생하지 않아야 한다. 즉, 인공어초가 흐름이나 파 등에 의해 이동하지 않을 조건으로 어초에 작용하는 유체력  $F_0$ 보다 어초의 마찰 저항이 크면 활동에 안정하고, 유체력  $F_0$ 에 의한 전도 모멘트보다 어초의 저항 모멘트가 크면 전도에 안정하다. 인공어초의 활동 및 전도 안전율에 대한 기준은 없으나, 관행상 1.2를 안전율로 사용하고 있으며(Yoon, 2018), 전도 안전율을 1.5로 적용한 사례도 있다(NFRDI, 2009).

인공어초의 활동(sliding)에 대한 안전율( $SF_s$ )은 식(6)와 같이 나타낼 수 있고(NFRDI, 2017), 안정조건은 유체의 작용력( $F_0$ )보다 인공어초의 저면 마찰 저항이 큰 경우이다.

$$SF_s = \frac{W\mu(1-w_0/\sigma_G)}{F_0} \geq 1.2 \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $W$ 는 인공어초의 공기 중 중량,  $\mu$ 는 인공어초와 해저 지반의 마찰계수로서 0.5~0.6의 값을 가지며,  $\sigma_G$ 는 인공어초 재료의 단위체적중량을 의미한다.

또한 인공어초의 전도(overturning)에 대한 안전율( $SF_o$ )은 식(7)와 같이 나타낼 수 있고(NFRDI, 2017), 안정조건은 저항 모멘트가 전도 모멘트보다 큰 경우이다.

$$SF_o = \frac{W(1-w_0/\sigma_G)l_w}{F_0 h_0} \geq 1.2 \dots\dots\dots (7)$$

여기서,  $l_w$ 는 전도와 회전의 중심에서 무게중심까지의 수평거리,  $h_0$ 은  $F_0$ 의 작용높이를 나타낸다.

## 2. Morison 식을 이용한 어초 안정 중량 산정식

Morison 식의 어초에 작용하는 외력은 유체의 밀도와 유속이 일정하다고 가정한다면 오직 항력

계수와 투영 단면적만의 함수가 된다(Kim et al., 2009). 또한 Seo(2000)가 제시한 지반 세굴이 발생하지 않을 경우에 대한 안정 조건으로 활동에 대한 안전율을 나타내는 식(6)를 어초의 중량에 대한 식으로 수정하면 활동에 대한 안정 중량은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$W_{SF_s} \geq \frac{1.2 \times F_0}{\mu(1 - w_0/\sigma_C)} \dots\dots\dots (8)$$

또한 식(6)를 인공어초에 작용하는 유체력의 최댓값에 대해 수정하면 활동에 대한 안정 한계 유체력은 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$F_{SF_s} \leq \frac{W\mu(1 - w_0/\sigma_C)}{1.2} \dots\dots\dots (9)$$

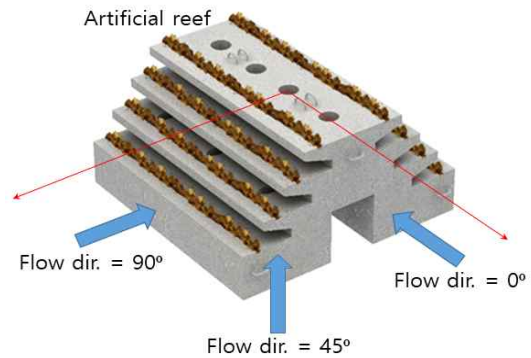
식(8), (9)에서 어초의 중량이 안정 중량  $W_{SF_s}$ 의 값 이상, 어초에 작용하는 외력이 안정 한계 외력  $F_{SF_s}$ 의 값 이하일 때 안정하다.

### 3. 사단경사형 어초의 이론적 안정성 평가 실험

본 연구에서 적용하고자 하는 사단경사형 어초는 패조류형 어초로서 수산자원 증식을 목적으로 패조류의 위집효과와 생산력 향상을 위해 개발된 인공어초이다. 해중립 조성용 조립초로서 갯녹음 현상이 발생한 수심이 얇은 5~15 m내의 관리수역에 해조의 종묘를 인위적으로 이식하여 해조류가 착생하고 성장함으로써 단기간에 해중립을 조

성하고, 자연 상태의 어장을 회복함과 동시에 어류나 패류의 은신장, 산란장, 성육장으로 공간을 조성하는데 목적이 있다(Yoon, 2018).

사단경사형 인공어초의 재원을 간략히 살펴보면 재질은 철근 콘크리트, 3.0 m(L) x 3.0 m(B) x 1.4 m(D)의 규격을 가지며, 콘크리트 17,048 kg, 철근 352 kg의 중량(총중량 W는 17.4 ton)이며, 겉용적은 7.25 m<sup>3</sup>을 가진다.



[Fig. 1] The shape of the four-step inclined artificial reef used in our study. The arrows indicate the three flow directions used to calculate the force of the waves based on the Morison equation.

본 연구에서 외력 산정을 위해 이용한 사단경사형 어초의 형상은 [Fig. 1]과 같으며, 어초에 작용하는 유체력 작용방향(0°, 45°, 90°) 작용면에 대한 어초의 특성 값은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Drag coefficients, projection area, and maximum width of the artificial reef in each flow direction (0°, 45°, 90°)

Front view			
Flow direction ( $\theta$ )	0°	45°	90°
projection Area ( $m^2$ )	2.51	5.00	4.20
Drag Coefficient ( $C_D$ )	0.930	0.722	0.845
projection Area ( $m^2$ ) $\times$ $C_D$	2.4096	3.61	3.549
Maximum Width (m)	3.0	4.24	3.0

<Table 2> Specifications of the artificial reef and external environmental conditions

Four-step inclined (AR)		External condition	
Height(m)	1.4	Mass coefficient $C_M$	1.60
Volume $V(m^3)$	7.214	Depth $h(m)$	5, 10, 15, 20
Weight(ton)	17.28	Wave height $H(m)$	0.2h, 0.4h, 0.6h
Weight per unit volume $\sigma_G (ton/m^3)$	2.395	Wave period $T(sec)$	6.0, 8.0, 10.0, 12.0
Friction coefficient $\mu$	0.6	Design velocity $u_0(m/s)$	2.0

유체의 외력 작용방향별 항력계수는 전산유체 역학 해석모델(ANSYS-CFX)을 이용하여 직접 계산하였다.

사단경사형 어초에 작용하는 유체력 산정과 안정성 검토를 위한 어초의 체원과 외력조건은 <Table 2>와 같으며, 어초가 시설되는 해역의 조건을 고려하였다. 항력계수( $C_D$ ) 및 투영 단면적, 인공어초 최대폭은 각 외력작용방향의 <Table 1>의 값, 질량계수( $C_M$ )는 천이수역 조건에 해당하는 값 1.6을(Ryu and Kim, 1994), 설계 유속( $u_0$ )은 인공어초 안정성 평가 기준(해양수산부 훈령 제 86호 ‘인공어초시설사업 집행 및 관리규정’) 2.0 m/s를 각각 적용하였다.

본 연구에서는 수심과 파랑 조건만을 매개 변수로 적용하여 유체력을 산정하였으며, 이때 유체력을 외력으로 판단하였다. 해저 지형 경사는 어초의 적지 조건을 고려하여 평탄한 바닥면으로 가정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 어초의 외력 및 안정성 검토

Morison 식을 이용하여 사단경사형 어초에 작용하는 외력과 활동, 전도의 안정성을 검토한 결과는 <Table 3>과 같으며, 안정성 검토 결과가 불안정한 것은 음영 처리하였다. 또한 표에 0°, 45°, 90°의 외력작용방향으로 작용하는 외력과 활동, 전도의 안정성 검토 결과를 각각 나타내었다.

$h/L$ 는 0.061~0.363의 범위로서 어초가 위치하는 수심은 미소진폭과 이론에 따르면 심해와 천해의 중간역 수심 영역에 해당한다.

<Table 3>에서 제시된 결과로부터 사단경사형 어초는 대체적으로 주어진 설계 유속( $u_0$ ), 파고( $H$ ), 주기( $T$ ), 수심( $h$ ) 조건에서 활동 및 전도에 대해 안전율 1.2이상의 값을 보였으나, 외력 작용방향이 45°, 90°의 수심 15m, 20 m에서 고파랑이 작용할 때, 활동에서 불안정한 것을 확인 할 수 있다(음영으로 표기된 부분).

또한 <Table 3>에서 동일한 설계 파고, 주기에서 수심이 깊어질수록 유체력이 감소하였고, [Fig. 2]에서 동일한 설계 파고일 때 5 m의 수심에서 주기가 증가할수록 어초에 미치는 유체력( $F$ )이 감소하였다. 반면에 동일한 설계 파고, 10, 15, 20 m의 수심에서는 주기가 증가할수록 대체적으로 유체력( $F$ )이 증가하였으며(<Table 3>), 20 m 수심의 경우를 [Fig. 3]에 나타내었다.

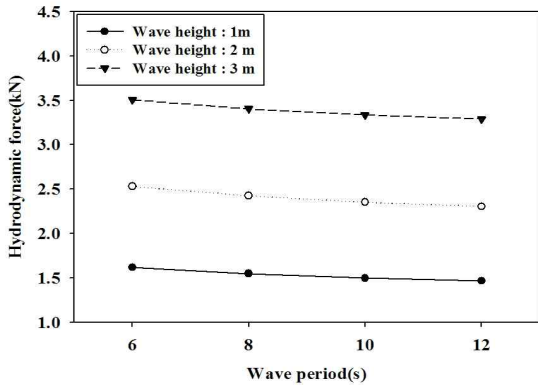
유체력이 가장 크게 산정된 45° 방향의 일정한 수심에서 각 파고별 설계 주기의 변화에 따른 유체력 산정 결과를 [Fig. 3], 각 수심별 설계 파고의 변화에 따른 유체력 산정 결과를 [Fig. 4]로 나타내었다. [Fig. 3]의 유체력 값 기울기를 통해, Morison 식에서 동일 주기에서 파고가 클수록 유체력이 큰 것으로 나타났다. 그리고 [Fig. 4]에서는 동일 주기에서 파고의 변화에 따라 유체력이 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 유체력 산정에서 주기의 영향보다 파고의 영향이

<Table 3> Sliding/overturning force and safety factor of a four-step inclined artificial reef according to the Morison equation in each flow direction

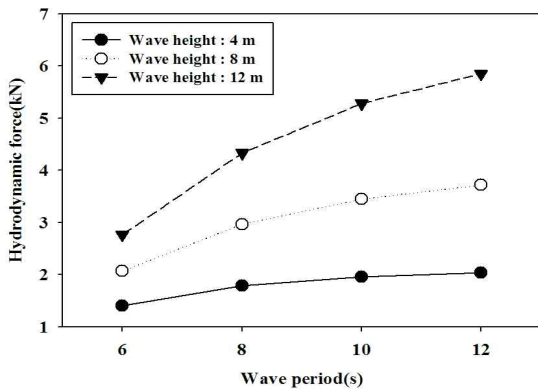
<i>h</i> (m)	<i>H</i> (m)	<i>T</i> (sec)	<i>L</i> (m)	<i>h/L</i>	Flow directions 0°			Flow directions 45°			Flow directions 90°		
					<i>F</i> (kN)	<i>SF<sub>S</sub></i> ( >1.2 )	<i>SF<sub>O</sub></i> ( >1.2 )	<i>F</i> (kN)	<i>SF<sub>S</sub></i> ( >1.2 )	<i>SF<sub>O</sub></i> ( >1.2 )	<i>F</i> (kN)	<i>SF<sub>S</sub></i> ( >1.2 )	<i>SF<sub>O</sub></i> ( >1.2 )
5	1	6	38.09	0.131	1.27	4.68	8.35	1.62	3.66	9.25	1.60	3.70	6.61
		8	53.08	0.094	1.16	5.09	9.09	1.55	3.83	9.67	1.53	3.88	6.93
		10	67.68	0.074	1.09	5.44	9.71	1.50	3.96	9.99	1.48	4.01	7.17
		12	82.08	0.061	1.04	5.70	10.18	1.47	4.05	10.21	1.44	4.10	7.33
	2	6	38.09	0.131	2.06	2.87	5.13	2.53	2.34	5.92	2.51	2.37	4.23
		8	53.08	0.094	1.87	3.17	5.66	2.42	2.45	6.18	2.40	2.48	4.42
		10	67.68	0.074	1.74	3.41	6.09	2.35	2.52	6.37	2.32	2.56	4.56
		12	82.08	0.061	1.65	3.59	6.41	2.30	2.57	6.49	2.27	2.61	4.66
	3	6	38.09	0.131	2.88	2.06	3.68	3.51	1.69	4.27	3.47	1.71	3.05
		8	53.08	0.094	2.62	2.26	4.04	3.40	1.74	4.40	3.36	1.76	3.15
		10	67.68	0.074	2.45	2.42	4.33	3.33	1.78	4.49	3.29	1.80	3.22
		12	82.08	0.061	2.34	2.54	4.53	3.29	1.80	4.55	3.24	1.83	3.27
10	2	6	48.41	0.207	1.33	4.46	7.97	1.69	3.52	8.87	1.67	3.55	6.35
		8	70.90	0.141	1.33	4.46	7.97	1.75	3.39	8.56	1.73	3.43	6.13
		10	92.37	0.108	1.28	4.62	8.25	1.75	3.40	8.57	1.72	3.44	6.15
		12	113.30	0.088	1.24	4.78	8.53	1.74	3.42	8.62	1.71	3.47	6.19
	4	6	48.41	0.207	2.19	2.71	4.84	2.68	2.22	5.59	2.65	2.24	4.00
		8	70.90	0.141	2.22	2.67	4.77	2.88	2.06	5.20	2.84	2.09	3.73
		10	92.37	0.108	2.16	2.74	4.89	2.94	2.02	5.10	2.90	2.05	3.66
		12	113.30	0.088	2.11	2.81	5.02	2.96	2.00	5.06	2.92	2.03	3.63
	6	6	48.41	0.207	3.07	1.93	3.45	3.74	1.59	4.00	3.71	1.60	2.86
		8	70.90	0.141	3.18	1.86	3.33	4.18	1.42	3.58	4.13	1.44	2.57
		10	92.37	0.108	3.16	1.88	3.35	4.36	1.36	3.43	4.30	1.38	2.46
		12	113.30	0.088	3.13	1.89	3.38	4.46	1.33	3.36	4.39	1.35	2.41
15	3	6	53.07	0.283	1.23	4.82	8.61	1.58	3.76	9.50	1.56	3.81	6.79
		8	81.79	0.183	1.38	4.30	7.68	1.81	3.28	8.27	1.79	3.32	5.93
		10	109.05	0.138	1.39	4.27	7.62	1.88	3.15	7.94	1.86	3.19	5.69
		12	135.35	0.111	1.37	4.32	7.72	1.91	3.10	7.82	1.89	3.14	5.61
	6	6	53.07	0.283	1.99	2.99	5.33	2.44	2.43	6.14	2.42	2.45	4.38
		8	81.79	0.183	2.33	2.55	4.55	3.02	1.97	4.96	2.98	1.99	3.55
		10	109.05	0.138	2.40	2.47	4.40	3.27	1.81	4.57	3.23	1.84	3.28
		12	135.35	0.111	2.42	2.45	4.38	3.41	1.74	4.39	3.36	1.77	3.15
	9	6	53.07	0.283	2.76	2.15	3.84	3.36	1.77	4.46	3.33	1.78	3.18
		8	81.79	0.183	3.36	1.76	3.15	4.42	1.34	3.38	4.37	1.36	2.42
		10	109.05	0.138	3.58	1.66	2.96	4.97	1.19	3.01	4.90	1.21	1.21
		12	135.35	0.111	3.68	1.61	2.88	5.28	1.12	2.84	5.20	1.14	2.04
20	4	6	55.05	0.363	1.07	5.53	9.88	1.40	4.24	10.70	1.38	4.29	7.66
		8	88.79	0.225	1.36	4.36	7.78	1.79	3.32	8.38	1.76	3.36	6.00
		10	121.24	0.165	1.44	4.11	7.35	1.95	3.04	7.66	1.93	3.08	5.49
		12	152.36	0.131	1.46	4.07	7.26	2.03	2.92	7.36	2.01	2.96	5.28
	8	6	55.05	0.363	1.66	3.57	6.37	2.07	2.87	7.24	2.05	2.90	5.18
		8	88.79	0.225	2.29	2.59	4.63	2.96	2.00	5.05	2.93	2.02	3.61
		10	121.24	0.165	2.53	2.35	4.19	3.44	1.72	4.35	3.40	1.75	3.12
		12	152.36	0.131	2.63	2.25	4.03	3.72	1.60	4.03	3.66	1.62	2.89
	12	6	55.05	0.363	2.26	2.62	4.68	2.77	2.14	5.41	2.74	2.16	3.87
		8	88.79	0.225	3.30	1.80	3.21	4.33	1.37	3.46	4.28	1.39	2.48
		10	121.24	0.165	3.79	1.57	2.80	5.28	1.12	2.83	5.21	1.14	2.03
		12	152.36	0.131	4.06	1.46	2.61	5.85	1.01	2.56	5.76	1.03	1.84

※ *h*(water depth), *H*(wave height), *T*(wave period), *F*(wave force),  
*SF<sub>S</sub>*(safety factor of sliding), *SF<sub>O</sub>*(safety factor of overturning), *L*(shallow wave length), *U<sub>0</sub>*:2m/s.

큰 것을 알 수 있으며, 위의 어초에 작용하는 유체력 산정 결과는 0°, 45°, 90°의 외력작용방향에서 모두 동일하였다(<Table 3>).



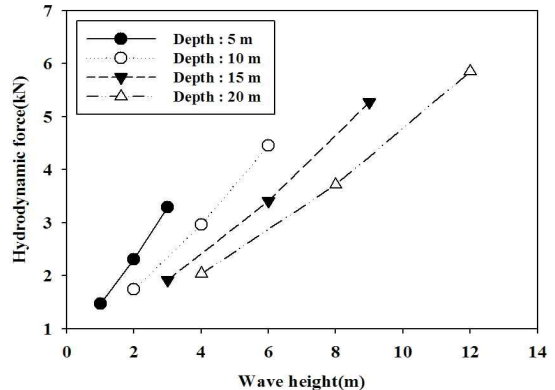
[Fig. 2] Comparison between the Hydrodynamic force and the wave period at a depth of 5 m for each wave height.



[Fig. 3] Comparison between the Hydrodynamic force and the wave period at a depth of 20 m for each wave height.

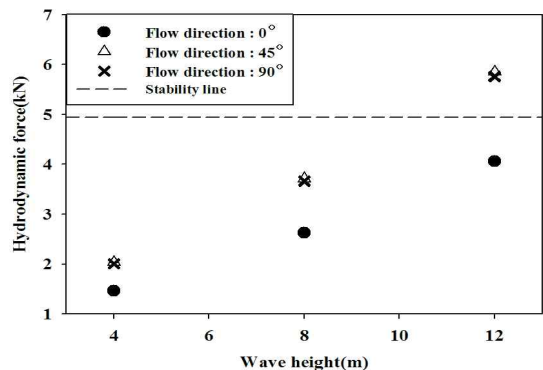
<Table 1>의 항력계수와 투영 단면적의 곱을 확인하면 45°와 90°는 비슷한 값을 나타내지만 45°의 값은 0°의 값보다 49.81% 큰 값을 나타낸다. 이러한 외력작용방향에 따른 단면특성 ( $C_D \times A$ ) 값의 차이로 45°, 90°의 외력작용방향으로 어초에 작용하는 외력이 0°의 외력작용방향으로 작용하는 외력보다 약 40% 크며, 이로 인해 15, 20 m의 수심에서 고파랑이 어초에 작용할 때

0° 외력작용방향의 활동에서는 안정하나, 45°와 90° 외력작용방향의 활동에서는 불안정한 결과를 보인다.



[Fig. 4] Comparison between the Hydrodynamic force and the wave height at each water depth ( $T=12$  sec.).

[Fig. 5]는 각 외력작용방향의 외력을 식(9)로 구한 활동에 대한 안정 한계 외력을 기준으로 나타낸 그래프이다. 그 값은 사단경사형 어초에 작용하는 외력이 4.94 kN 이하 일 때 안정하다고 판단할 수 있다. 그래프에서 12 m의 파고가 작용할 때, 45°와 90° 방향의 외력이 도시된 활동 안정 한계선을 넘어 불안정한 것을 확인 할 수 있다.

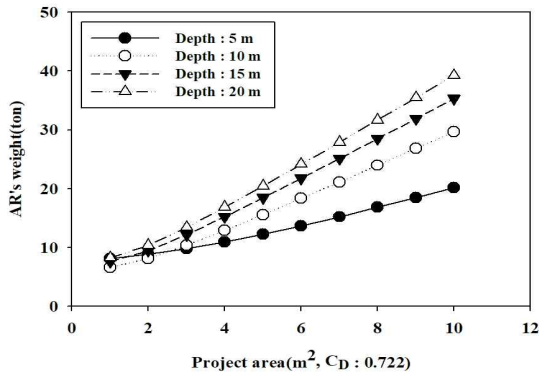


[Fig. 5] Comparison between the Hydrodynamic force and the wave height at a depth of 20 m and wave period of 12 seconds in each flow direction (0°, 45°, 90°).

결과적으로 같은 외력 조건이라도 유체의 작용면에 따라 어초에 작용하는 외력 값과 안정성 검토 결과가 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 어초에 유체력이 주로 작용하는 방향뿐만 아니라 다양한 각도에 대해서도 안정성 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 2. 어초의 안정 중량

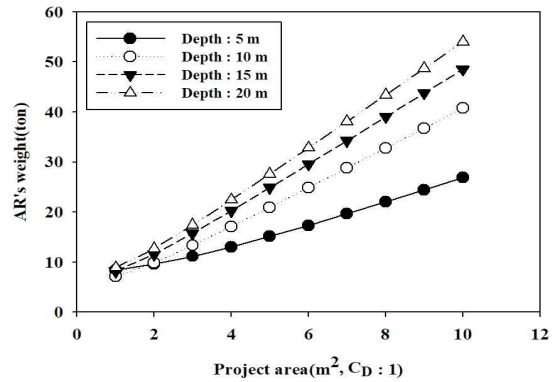
[Fig. 6]은 사단경사형 어초가 가장 큰 외력을 받는 45°의 흐름방향( $C_D=0.722$ )에 설계 외력이 작용할 때, 투영 단면적만을 변수로 두고 투영 단면적과 어초의 안정 중량의 관계를 나타낸 결과로 각 수심대 별로 가장 강한 설계 외력 조건에서 안정 중량 산정식(8)을 이용하였으며, 각 수심대에서 인공어초의 중량이 도시된 선보다 위쪽에 있어야 활동에 대한 안정성을 확보할 수 있다. [Fig. 6]의 경우 수심 20 m에서 중량이 39.26 ton 이상일 경우 안정하다.



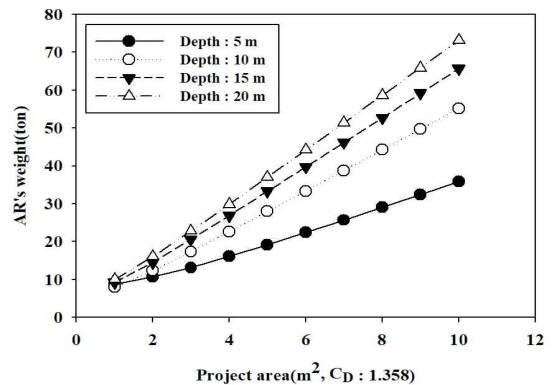
[Fig. 6] Stable weight against the projection area (drag coefficient = 0.722) of the artificial reef at each water depth.

[Fig. 7]은 사단경사형 어초의 항력계수를 현재 가장 많이 시설된 사각형 어초에 대해서 Kim et al.(2014)의 연구결과로부터 도출된 값,  $C_D=1$ 로 가정하여 [Fig. 6]와 동일한 설계 외력 조건에서 투영 단면적과 어초의 안정 중량의 관계를 나타

낸 결과이며, [Fig. 8]은 24개 인공어초에 대해 항력계수를 계산한 Kim et al.(2014)의 연구결과로부터 평균 값, 1.358을 안정 중량 산정식에 적용하여 동일한 설계 외력 조건에서 투영 단면적과 어초의 안정 중량의 관계를 나타낸 결과이다. 항력계수가 1인 경우의 [Fig. 7]에서 안정 중량 최댓값은 54.01 ton이며, 항력계수가 1.358인 경우의 [Fig. 8]은 73.10 ton의 안정 중량 최댓값을 가진다. [Fig. 6]와 [Fig. 8]를 비교한 결과 항력계수 0.636의 차이로 안정 중량 최댓값은 33.84 ton의 차이를 보인다.



[Fig. 7] Stable weight against the projection area (drag coefficient = 1.0) of the artificial reef at each water depth.



[Fig. 8] Stable weight against the projection area (drag coefficient = 1.358) of the artificial reef at each water depth.



<Table 4>는 투영 단면적에 따른 인공어초의 안정 중량을 수식으로 나타낸 결과이다. 투영 단면적을  $x$ , 인공어초의 안정 중량을  $y$ 로 두었으며, 항력계수가 0.722, 1, 1.358일 때의 각각의 경우에 대해 각 수심별로 나타내었다. 인공어초의 중량이 각 식에 투영 단면적의 값을 넣었을 때 나오는 안정 중량 값 이상이면 안정하다고 판단할 수 있다.

결과적으로 투영 단면적에 따른 인공어초의 안정 중량 산정에서 정확한 항력계수를 산정하는 것이 중요하며, 실제 사업 수행 시에는 인공어초 시설 해역의 특성과 정확한 인공어초의 제원으로 현장에서 인공어초의 안정성을 어초의 중량과 투영 단면적으로 간편하게 예측하여 활용 될 것으로 판단된다.

Ryu et al.(1994)의 연구에 따르면 쇄파대 부근에 인공어초를 설치할 경우 항력계수는 1.5~2.5 범위(분산이 심하나 쇄파점 부근에서의 항력계수는 평균 2.0 정도)로 제시한 바 있다. 따라서 본 연구 결과를 쇄파대에 적용하는 것은 다소 무리라고 할 수 있다. 하지만 Kim et al.(2009)이 제시한 바와 같이 인공어초 안정성 평가시 완전 쇄파가 되어 수립자가 더 이상 진동하지 않고 한 방향으로만 진행되는 경우에는 적용이 가능할 것으로 생각된다. 다만 쇄파의 거동이 단파의 형태를 지니거나 쇄파대에 설치될 해중탑초에 대해서는 파의 단파거동으로 부터 유도된 별도의 공식을 적용하는 것이 요구된다.

#### IV. 결론

Morison 식을 이용하여 사단경사형 어초에 작용하는 유체의 외력작용방향(0°, 45°, 90°) 작용면에 대해 어초에 작용하는 외력을 산정하였고, 안정성 검토 결과를 분석하여 투영 단면적에 따른 인공어초의 안정 중량을 제안하였다.

외력 산정 결과 외력은 수심, 파고, 주기, 단면 특성 등의 관계에 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다. 또한 파고가 주기보다 외력에 미치는 영향이 크며, 일정 파고와 주기에서 수심이 증가할수록 외력은 감소하고, 일정 수심(5 m)에서는 파고와 주기에 대해 Morison 식의 항력과 관성력의 관계에 따라 전체 외력이 감소 또는 증가한다. 이를 정확하게 판단하기 위해서는 Morison 식에 영향을 미치는 외력조건(수심, 파고, 주기, 단면 특성 등)의 민감도가 추가적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.

인공어초의 유체의 외력작용방향(0°, 45°, 90°) 작용면의 항력계수와 투영 단면적의 곱은 각각 2.4096, 3.61, 3.549의 값을 가진다. 45°의 값이 0°의 값보다 49.81% 큰 값을, 45°와 90°는 비슷한 값을 나타냈다. 이러한 단면특성 값의 차이로 어초에 작용하는 외력이 0°의 방향보다 45°, 90°의 방향에서 약 40% 증가하였고, 이로 인해 고파랑 설계 외력이 어초에 작용할 때 0° 방향 활동에서는 안정하나, 45°와 90° 방향의 활동에서는 불안정한 결과를 보였다.

<Table 4> Regression curve of the four-step inclined artificial reef at each water depth

Water Depth	Regression curve		
	$C_D = 0.722$	$C_D = 1.0$	$C_D = 1.358$
5	$y = 0.0591x^2 + 0.7121x + 7.2523$	$y = 0.0714x^2 + 1.3168x + 6.7686$	$y = 0.0758x^2 + 2.2354x + 6.0948$
10	$y = 0.0584x^2 + 1.9851x + 4.1853$	$y = 0.0514x^2 + 3.2402x + 3.4155$	$y = 0.0423x^2 + 4.8367x + 2.7006$
15	$y = 0.0668x^2 + 2.4213x + 4.6519$	$y = 0.0573x^2 + 3.929x + 3.7409$	$y = 0.0462x^2 + 5.8316x + 2.922$
20	$y = 0.0719x^2 + 2.7403x + 4.9317$	$y = 0.0608x^2 + 4.4244x + 3.9301$	$y = 0.0485x^2 + 6.5399x + 3.0485$

이는 인공어초가 본래의 목적대로 기능을 발휘하기 위해서 유체가 주로 작용하는 방향뿐만 아니라 다양한 각도에 대해서도 안정성 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Morison 식을 이용한 인공어초에 작용하는 외력 산정에서 유체의 밀도와 유속이 일정하다고 가정하여 수심대 별로 투영 단면적에 대한 인공어초의 안정 중량을 제안하였다. 결과로 항력계수 0.636의 차이로 안정 중량 최댓값은 33.84 ton의 차이를 보였으며, 이는 정확한 항력계수의 판단이 인공어초의 설계에 중요하다는 것을 알 수 있다.

연구 결과를 기초하여 향후 실제 인공어초 사업 수행시 해역의 특성과 유체의 외력작용방향 (0°, 45°, 90°)에 대한 정확한 인공어초의 제원을 바탕으로 인공어초 개발자가 새롭게 개발되는 인공어초의 안정성을 간편하게 예측할 수 있을 것이다. 또한 판단된 안정 중량을 인공어초 시설 현장에 적용한다면 인공어초가 보다 안정하게 시설될 것으로 판단된다. 그러나 연구 과정에서 해결하지 못한 쇄파영역에서의 어초에 미치는 외력 특성 연구에 대해서 보다 추가적인 연구 과정이 요구된다고 할 것이다.

## References

- Horikawa K(1979). Coastal Engineering, University of Tokyo Press.
- Jeon YH, Park JH and Yoon HS(2018). Development of a Program for Analyzing the Stability of Artificial Reefs -Application of a Computer Coding System-, Journal of the Korean Soc. Mar. Eng., 24(5), 537~544.
- Jung S and Na WB(2018). Placement Models of Marine Forest Artificial Reefs to Increase Wake Region Efficiency, Journal of Fisheries and Marine Science Education, 30(1), 132~143.
- Kim CG, Oh TG, Suh SH, Kim DK, Kim BG and Choi YS(2009). Review of stability calculation of an artificial reef in the breaking wave zone of coastal waters, Journal of the Korean Soc. Mar. Eng., 33(6), 965~974.
- Kim DH, Jung S and Na WB(2016). Wake Region Estimation of Artificial Reefs using Wake Volume Diagrams, Journal of Fisheries and Marine Science Education, 28(4), 1042~1056.
- Kim NH(1995). Artificial fish as a fishery structure, Korea Fisheries Infrastructure Promotion Association (FIPA), Fishing port, 43~47.
- Lee MO, Kim JK and Kim BK(2016). A Review-status of Development and Research of Artificial Reefs in the East Asian Countries, Journal of Fisheries and Marine Science Education, 28(3), 630~644.
- Morison JR, O'Brien MP, Johnson JW and Schaaf SA(1950). The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans. 189, 149~157.
- National Fisheries Research and Development Institute(NFRDI)(2009). Development of artificial reefs and their effectiveness, Report of NFRDI(TR-2010-RE-012), 37.
- National Fisheries Research and Development Institute(NFRDI)(KDS-64-45-20:2017). Design standards for port and fishing port construction, 20.
- Ryu CR and Kim HJ(1994). A study on the characteristics of wave forces on artificial reefs, Bull. Korean Fisheries Soc., 27(5), 605~612.
- Seo SH(2000). A Study on the Efficiency of Artificial Steel Fish Reef, Yosu National University, Ms thesis, 54~55.
- Sohn BK(2007). An Experimental Study on the Stability of Artificial Reefs for Shellfish and Seaweed, J. Ocean Eng. Technol., JOET, 21(6), 120~124.
- Woo JH, Kim DH, Yoon HS and Na WB(2014). Characterizing Korean general artificial reefs by drag coefficients, Ocean Engineering, 82, 105~114.
- Yoon HS(2018). Evaluation of Fishery Resource Enhancement by General Artificial Reefs in South Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 21(2), 119~129.

- Received : 01 February, 2019
- Revised : 14 March, 2019
- Accepted : 26 March, 2019