



설치 조건에 따른 인공어초의 초기침하 산정

김민지 · 나원배[†]

부경대학교(학생) · [†]부경대학교(교수)

Initial Settlement Estimation of Artificial Reefs According to Installation Condition

Minji KIM · Won-Bae NA[†]

Pukyong National University(student) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

Generally, artificial reefs (ARs) are installed on the seabed using a free fall method or a guided way through cables or wires. Currently, the cable method is recommended for most installation activities because this method can locate the target seabed in a more exact manner than the free fall method. However, even with careful installation with the cables, AR deployment may cause the initial settlement of the seabed and accordingly a problem in their efficiency and stability. This study numerically investigates the initial settlement of ARs using a transient structural analysis tool and considering installation conditions such as installation velocity, and seabed soil properties and compositions. From the results, the following conclusions were made. First, if the installation velocity is less than 1m/s during the AR installation with the cables, the initial settlements of a fixed seabed condition are generally similar. Second, the initial settlement of the seabed increases when the contact angle with the cube-type AR increases. Third, the initial settlement occurs considerably when the ARs are installed on the seabed composed of saturated sand and clay. This considerable settlement causes a tremendous loss of the usable space of ARs for marine fauna and flora. Thus, it is expected to require reinforcement of the seabed (saturated sand and clay) before installation of ARs.

Key words : Artificial reef, Initial settlement, Seabed soil

I. 서론

인공어초(artificial reefs)는 해양생물이 자랄 수 있는 환경 조성을 목적으로 만든 인공구조물로써 해저 생물들의 서식지 확보, 낚시터 개발, 다이빙 장소 개발 등 다양한 기능을 가지고 있다 (Düzbastılar and Şentürk, 2009; Han, 2016; Kim et al., 2016; Jung and Na, 2018).

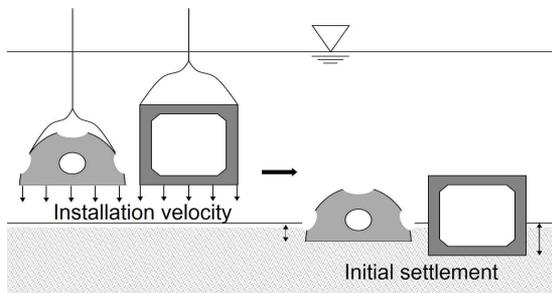
인공어초를 설치할 때 일반적으로 선박에서 자유낙하 시키거나 케이블을 이용한다(Yoon et al., 2016). 인공어초와 해저지반 사이에 발생하는 충돌로 인해 초기침하(intial settlement)가 발생할 수 있고 이는 인공어초의 공용적(usable volume)을 감소시킨다. 여기서 공용적은 단일 어초 또는 어초 집합이 해양생물에게 제공할 수 있는 공간 체적을 의미한다. 초기침하의 산정은 유효공용적

[†] Corresponding author : 051-629-6588, wna@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

(effective usable volume) 평가에 아주 중요하다.

기존의 인공어초의 침하에 관련된 연구에는 해저지반 보강에 따른 인공어초의 침하 및 세굴 특성(Yun et al., 2016), 토목섬유를 이용한 인공어초 침하 저감(Ha and Kim, 2015), 고흥해역 연성지반의 인공어초 침하(Kim et al., 2010) 등이 있다. 상기의 연구들은 설치 후 인공어초의 중량에 의해 발생하는 장기침하(long-term settlement)에 초점을 맞추고 있다. 충돌로 인한 초기침하는 장기침하보다 짧은 시간에 급격히 발생할 수 있다. 따라서 해저지반에서 어초의 초기침하량을 산정하여 어초의 안정성을 파악하고 유효공용적 산정으로 어초의 효율성을 파악하는 것이 필요하다.



[Fig. 1] Concept of the settlement of an AR

본 연구에서는 [Fig. 1]과 같이 어초가 설치될 때 설치속도(installation velocity)가 발생한다는 점을 고려하여 해저지반에 설치속도로 충돌시켜 초기침하량을 산정하였다. 이를 위해 1971년 이래로 대한민국의 연안 해역에 설치된 인공어초 현황을 고려하여 사각어초(cube-type reef)와 반구형어초(half-ball type reef)를 선택하였다. 인공어초의 설치속도는 정확히 문서화된바가 없으나, 해저지반과 인공어초 간에 충돌 시 충격력을 계산하는데 사용되는 설치속도는 일반적으로 1.0m/s 미만이므로(Kim et al., 2008) 설치 속도는 0.2m/s, 0.4m/s, 0.6m/s로 설정하였다. 해저지반은 포화된 모래(70%)와 자갈(30%)로 구성된 것과 포화된 모래(85%)와 점토(15%)로 구성된 두 가지를 선택하였다. 또한 사각어초의 경우 네 가지 설치 각도

(0°, 5°, 10°, 15°)를 고려하여 해석 인자를 설치속도, 해저지반 조건, 및 설치각도로 설정하여 침하량을 산정하였다. 반면 반구형어초의 경우에는 형상특성상 설치속도와 해저지반 조건을 고려하여 해석을 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 어초

대상 어초는 [Fig. 2]에 나타난 사각어초와 반구형어초이다. 이들 제원은 <Table 1>과 같다. 여기서 B, L, H, t, Vu, 그리고 W는 각각 어초의 폭, 길이, 높이, 두께, 공용적과 중량을 의미한다. 두 어초는 콘크리트와 철근으로 제작되나 본 연구에서는 어초의 침하량을 산정하기 위해 콘크리트로 어초의 중량을 모델링하였다. 또한 사각어초의 안쪽 모서리는 충돌해석에 영향을 미치지 않기 때문에 모서리 부분을 직선 부재가 이어지는 형태로 수정하여 모델링하였다.

어초의 재료모델로 RHT 콘크리트 모델(Riedel et al., 1999)을 사용하였다. 콘크리트의 경우 공극이 있고 비균질적인 재료로 구성되어 있기 때문에 비선형적 압축거동을 하며 인장에는 매우 취약한 재료이다. RHT 콘크리트 모델은 이러한 콘크리트의 특징을 잘 살려 충돌 및 폭발에 따른 콘크리트의 손상 해석에 주로 쓰인다. 일정한 방정식에 콘크리트의 재료 상수를 대입하여 재료 모델을 구성한다(Woo et al., 2009). <Table 2>는 RHT 콘크리트 모델에 사용된 물성치와 재료 상수들을 나타낸다.



[Fig. 2] Target artificial reefs: a cube-type reef (left) and a half-ball type reef (right)

<Table 1> Data of target artificial reefs

Type	B (m)	L (m)	H (m)	t (m)	V _u (m ³)	W (kN)
cube	2.00	2.00	2.00	0.25	8.00	33.34
half-ball	2.00	2.00	1.30	0.15	3.00	21.57

<Table 2> Material properties of RHT concrete model (Riedel et al., 1999)

Parameter	Value
Porous density (kg/mm ³)	2.010 ⁶
Porous sound speed (m/s)	2920
Initial compaction pressure (MPa)	23.3
Solid compaction pressure (GPa)	6.0
Compaction exponent	3
Bulk modulus <i>A1</i>	3.52710 ⁷
Parameter <i>A2</i>	3.95810 ⁷
Parameter <i>A3</i>	9.0410 ⁶
Parameter <i>B0</i>	1.22
Parameter <i>B1</i>	1.22
Shear modulus (GPa)	16.7
Compressive strength (MPa)	35.0
Tensile strength (ft/fc)	0.1
Shear strength (ft/fc)	0.18
Intact failure surface constant <i>A</i>	1.6
Intact failure surface exponent <i>N</i>	0.61
Brittle to ductile transition	0.0105
Fractured strength constant <i>B</i>	1.6
Fractured strength exponent <i>M</i>	0.61
Damage constant <i>D1</i>	0.04
Damage constant <i>D2</i>	1
Principal tensile failure stress (MPa)	5
Fracture energy (J/m ²)	120
Erosion strain	1.5

2. 해저지반

해저지반은 8m×8m×2m의 크기로 모델링되었다. 해저지반은 포화된 모래(70%)와 자갈(30%)로 구성된 것과 포화된 모래(85%)와 점토(15%)로 구성된 두 가지를 고려하였다.

해저질은 모래, 점토, 실트, 자갈 등 다양한 재

료로 이루어져있으며 입자 크기, 입자 크기 분포 및 함수율 등이 토질 특성에 중대한 영향을 미칠 수 있기 때문에 매우 복잡한 재료이다.

동적 유한 요소 해석프로그램인 ANSYS AUTODYN에서 제공되는 *Compaction* 모델은 공극이 있는 재료에 주로 사용되는 모델이다. 하지만 이 경우 공극이 있는 경우에는 잘 들어맞으나 재료에 포화도에 대한 인자가 포함되지 않아서 포화에 대한 영향을 고려할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 Grujicic과 Bell(2011)이 제안한 포화도를 고려한 *Compaction* 모델을 사용하였다. 포화도를 고려한 *Compaction* 모델인 CU-ARL 모래 모델은 지반 모델이 필요한 모든 기본 성분을 포함하고 있으며 점토 또는 자갈로 구성된 모델도 포함하고 있다. 예를 들면 포화된 모래의 강도 (strength) 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{y,sat} = \begin{cases} \phi_{sat} P_{sat}, & 0 < P_{dry} \leq P_{MC} \dots (1) \\ \phi_{sat} P_{MC}, & P_{dry} > P_{MC} \end{cases}$$

여기서 ϕ_{sat} 는 항복응력과 압력에 관한 비례상수, P_{sat} 는 포화압력, P_{dry} 는 건조압력, P_{MC} 는 모르-쿨롬 압력이다. 비례상수 ϕ_{sat} 는 식 (1)과 같은 구간에서 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\phi_{sat} = \begin{cases} 0.1 + 1.2732 \frac{P_{dry}}{P_{MC}} & \dots \dots \dots (2) \\ 1.3732 \end{cases}$$

3. 유한 요소 해석

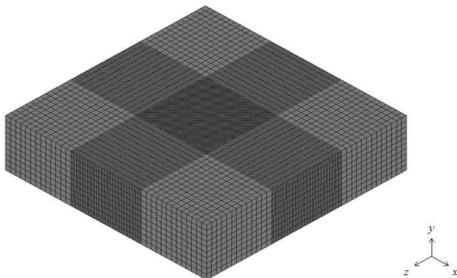
본 연구는 어초의 침하량을 산정하기 위해 외연적 동적 유한요소 해석에 특성화 되어 있어 충돌해석에 적합한 프로그램인 ANSYS AUTODYN을 사용하였다. ANSYS-AUTODYN은 재료모델을 구성하는데 상태방정식, 강도방정식, 파괴방정식, 그리고 붕괴기준이 요구된다. 본 연구의 RHT 콘크리트 모델의 경우는 p-a 상태방정식, RHT 강도

파괴 방정식, 그리고 기하학적 변형률 기반 붕괴 기준이 사용되었다. 본 연구에서는 어초의 응력 상태보다 지반의 침하상태에 초점을 맞추고 있으므로, 어초 재료모델에 관한 서술은 생략한다.

어초는 [Fig. 3]과 같이 사각어초는 0.5m의 크기를 갖는 육면체 요소로, 반구형어초는 0.5m이하의 크기를 갖는 육면체와 사면체 요소로 설정하였다. 해저지반은 [Fig. 4]와 같이 어초와 충돌하는 중심부분은 요소 크기를 0.05m, 바깥쪽 부분은 0.2m로 모두 육면체 요소로 설정하였다.



[Fig. 3] Finite element models of cube-type reef (left) and half-Ball type reef (right)



[Fig. 4] Finite element model of the seabed

Ⅲ. 해석 결과

1. 침하량

포화된 모래(70%)와 자갈(30%)로 구성된 해저지반에서, 설치각도가 0°일 때 설치속도에 따른 사각어초의 최대 침하량은 0.18cm, 0.23cm, 0.29cm로 나타났다. 반면 설치각도가 5°일 때 최대 침하량은 2.9cm, 3.0cm, 3.2cm, 설치각도가 10°일 때는 4.1cm, 4.3cm, 4.6cm, 그리고 설치각도가

15°일 때 6.6cm, 6.8cm, 7.0cm로 나타났다. <Table 3>은 이들 침하량을 나타낸다.

<Table 3> Maximum settlement (cm) of cube-type AR installed on the seabed of sand (70%) and gravel (30%) composition

Installation velocity (m/s)	Installation angle (deg.)			
	0	5	10	15
0.2	0.18	2.9	4.1	6.6
0.4	0.23	3.0	4.3	6.8
0.6	0.29	3.2	4.6	7.0

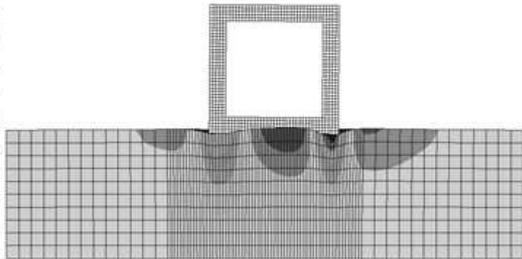
포화된 모래(85%)와 점토(15%)로 구성된 해저지반에서, 설치각도가 0°일 때 설치속도에 따른 사각어초의 최대 침하량은 각각 39.3cm, 39.4cm, 39.6cm로 나타났다. 반면 설치각도가 5°일 때 최대 침하량은 45.9cm, 46.1cm, 46.3cm, 설치각도가 10°일 때 47.9cm, 48.2cm, 48.2cm, 설치각도가 15°일 때 53.0cm, 53.3cm, 53.4cm로 나타났다.

<Table 4> Maximum settlement (cm) of cube-type AR installed on the seabed of sand (85%) and clay (15%) composition

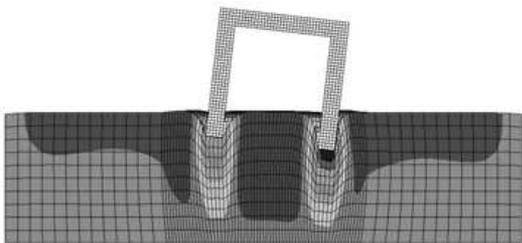
Installation velocity (m/s)	Installation angle (deg.)			
	0	5	10	15
0.2	39.3	45.9	47.9	53.0
0.4	39.4	46.1	48.2	53.3
0.6	39.6	46.3	48.2	53.4

<Table 4>는 이들 침하량을 나타낸다. [Fig. 5]와 [Fig. 6]은 사각어초가 0.6 m/s의 속도와 15°의 각도로 설치될 때 모래(70%)와 자갈(30%)로 구성된 지반과 모래(85%)와 점토(15%)로 구성된 지반의 침하 형상을 각각 나타낸다.

반구형 어초의 경우 설치된 속도에 따른 포화된 모래(70%)와 자갈(30%)로 구성된 해저지반에서 최대 침하량은 0.35cm, 0.37cm, 0.44cm로 나타났고, 포화된 모래(85%)와 점토(15%)로 구성된 해저지반에서, 최대 침하량은 39.2cm, 39.3cm, 39.5cm으로 나타났다. <Table 5>는 이들 침하량을 나타낸다.



[Fig. 5] Settlement contour of cube-type AR when the seabed is composed of saturated sand (70%) and gravel (30%) and installation is made with the installation angle of 15° and velocity of 0.6m/s

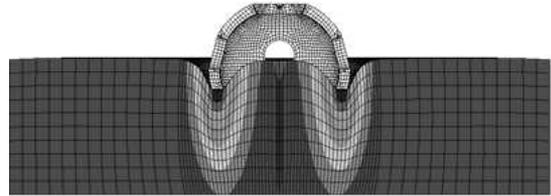


[Fig. 6] Settlement contour of cube-type AR when the seabed is composed of saturated sand (85%) and clay (15%) and installation is made with the installation angle of 15° and velocity of 0.6m/s

<Table 5> Maximum settlement (cm) of half ball-type AR

Installation velocity (m/s)	Seabed composition	
	sand-gravel (70%-30%)	sand-clay (85%-15%)
0.2	0.35	39.2
0.4	0.37	39.3
0.6	0.44	39.5

[Fig. 7]은 모래(85%)와 점토(15%)로 구성된 지반에 반구형 어초가 0.6m/s의 속도로 설치될 때 침하 형상을 나타낸다. 반구형 어초의 경우 설치 각도는 모두 0°이다.



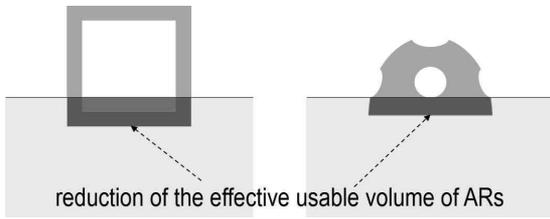
[Fig. 7] Settlement contour of half ball-type AR when the seabed is composed of saturated sand (85%) and clay (15%) and installation is made with the installation angle of 0° and velocity of 0.6m/s

2. 유효공용적

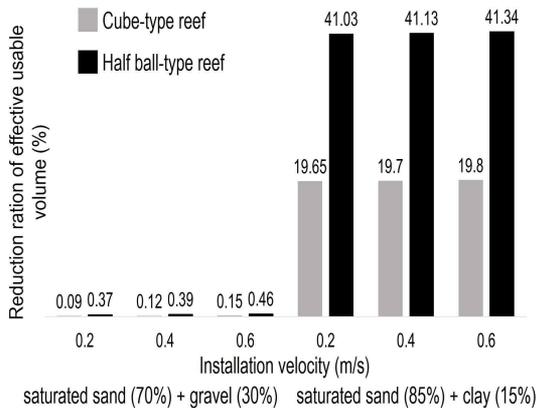
유효공용적은 해저에서 어초가 차지하는 공간과 어초 부재의 두께를 포함하는 부피로 정의된다(Yoon et al., 2016). 그러므로 유효공용적은 [Fig. 8]과 같이 어초의 침하로 인해 감소한다.

본 연구에서는 침하량에 대해 유효공용적 감소량을 평가하였다. [Fig. 9]와 같이 설치속도에 따라 모래-자갈 해저지반에서 사각어초의 유효공용적은 0.09%, 0.12%, 0.15%, 모래-점토 지반에서는 19.65%, 19.70%, 19.80% 감소하였다. 반구형 어초의 경우 설치속도에 따라 모래-자갈 해저지반에서 유효공용적은 0.37%, 0.39%, 0.46%, 모래-점토 해저지반에서는 41.03%, 41.13%, 41.34% 감소하였다. 상기의 결과로 보아 포화된 모래와 점토로 구성된 해저지반에서는 유효공용적 감소가 상당하다는 것을 알 수 있다. 이 경우 설치각도는 모두 0°이다.

[Fig. 10]은 설치각도에 따른 사각어초의 유효공용적 감소율을 나타낸다. 모래-자갈 해저지반에서 설치각도가 5°일 때, 유효공용적은 1.13%, 1.15%, 1.20%, 설치각도가 10°일 때 1.38%, 1.42%, 1.48%, 설치각도가 15°일 때 1.93%, 1.98%, 2.00% 감소하였다. 모래-점토 해저지반의 경우 설치각도가 5°일 때 15.10%, 15.13%, 15.13%, 10°일 때 13.70%, 13.75%, 13.73%, 15°일 때 14.20%, 14.25%, 14.25% 유효공용적이 감소하였다.

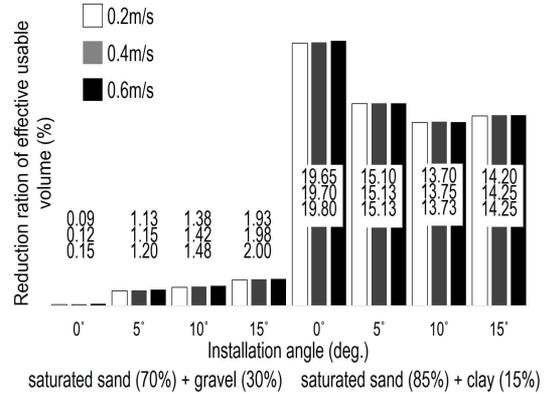


[Fig. 8] Concept of reduction of effective usable volume of ARs

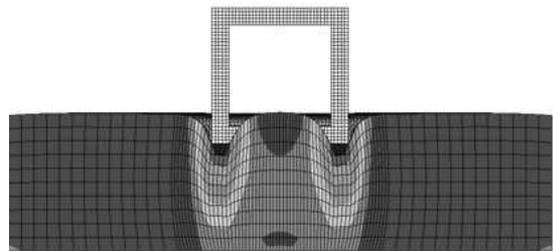


[Fig. 9] Reduction ratio of effective usable volume of cube-type and half ball-type reefs, considering two seabed conditions(sand 70%-gravel 30% and sand 85%-clay 15%), three installation velocities (0.2, 0.4, and 0.6m/s), and installation angle of 0°

[Fig. 10]에서 모래(70%-자갈(30%)의 지반구성 (첫 번째 4개 그래프)에서는 사각어초와 지반의 충돌각도가 증가하면 유효공용적 감소가 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 모래(85%-점토(15%)의 경우(두 번째 4개 그래프) 충돌각도가 0°일 때 유효공용적 감소가 오히려 더 커지는 경향을 나타낸다. 즉 설치각도가 0°일 때(19.65, 19.70, 19.80%) 다른 각도(5°, 10°, 15°)의 경우보다 최대 침하의 작지만 유효공용적 감소율은 더 크다. 이는 [Fig. 11]과 같이 어초와 지반의 충돌각도가 0°일 때 사각어초 주변에서 균등침하가 발생하기 때문이다([Fig. 6]과 비교하면 명확해진다).



[Fig. 10] Reduction ratio of effective usable volume of cube-type AR with respect to four installation angles (0, 5, 10, and 15°)



[Fig. 11] Settlement contour of cube-type AR when the seabed is composed of sand (85%) and clay (15%) and installation is made with the installation angle of 0° and velocity of 0.6m/s

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 인공어초가 설치될 때, 어초와 해저지반 사이에 충돌로 인한 침하량을 산정하였다. 세 가지 속도 조건, 두 가지 해저지반 조건이 두 종류의 어초에 적용되었다. 해석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다. 첫째, 케이블을 사용하여 어초를 설치할 때, 설치속도가 1m/s 미만이면 설치속도 변화에 따른 어초의 초기침하는 대체로 유사하다. 둘째, 어초의 설치 중에 사각어초와 해저지반과의 접촉각이 증가하면 최대 침하는 증가

한다. 하지만 포화된 모래와 점토로 구성된 해저 지반의 경우 설치각도가 0°일 때 유효공용적 감소율은 오히려 더 커지는 경향을 나타낸다. 즉 설치각도가 0°일 때 다른 각도의 경우보다 최대 침하는 작지만 유효공용적 감소율은 더 크다. 이는 어초와 지반의 충돌각도가 0°일 때 사각어초 주변에서 균등침하가 발생하기 때문이다. 셋째, 초기침하는 포화된 모래와 점토로 구성된 해저지반에 설치될 때 상당히 크게 발생한다. 사각어초와 반구형어초 모두 약 39cm의 침하가 발생하였고, 그로 인해 유효공용적은 사각어초는 약 20%, 반구형어초는 약 41%가 감소하였다. 이러한 감소는 해양생물들이 사용가능한 공간의 심각한 손실로 간주될 수 있으며, 포화된 모래와 점토로 구성된 해저지반에 어초 설치를 배제하거나 설치시 해저지반을 보강하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

References

- Düzbastılar FO & Şentürk U(2009). Determining the weights of two types of artificial reefs required to resist wave action in different water depths and bottom slopes, *Ocean Engineering* 36(12), 900-913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.06.008>.
- Grujicic M & Bell WC(2011). A computational analysis of survivability of a pick-up truck subjected to mine detonation loads, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 7(4), 386-423. <https://doi.org/10.1108/15736101111185289>.
- Ha YS & Kim YT(2015). An experimental study on settlement reduction of artificial reef using geosynthetics, *J. Korean Geosynthetics Society* 14(3), 21-29. 10.12814/jkgss.2015.14.3.021.
- Han S(2016). Estimation of seabed settlement and impact force for a box-type artificial reef considering seabed soil conditions in the initial installation procedure, Master's Thesis, Pukyong National University.
- Jung S & 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. <http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2018.30.1.132>.
- Kim D, 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. <http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.4.1042>.
- Kim DK, Suh SH, Cho JK, Kim CG, Cho IH and Kim BS(2010). Settlement characteristics of square reefs installed on soft seafloor ground, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 34(1), 163-167. 10.5916/jkosme.2010.34.1.163.
- Kim T. · Kim C. & Kim D.(2008). Development of coastal zone by artificial reef, Chonnam National University Press.
- Riedel W, Thoma K, Hiermaier S and Schmolinske E(1999) Penetration of reinforced concrete model for hydrocodes, 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Straussberg.
- Woo J, Na WB and Kim HT(2009). Numerical simulation of arch-type submarine cable protector under anchor collision, *Journal of Ocean Engineering and Technology* 23(1), 96-103.
- Yoon HS, Kim D and Na WB(2016). Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management, *Ocean & Coastal Management* 120, 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.12.007>.
- Yun DH, Suh SH and Kim YT(2016). Settlement and scour characteristics of artificial reef according to reinforced ground, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(3) 186-193. 10.5574/KSOE.2016.30.3.186.

-
- Received : 19 November, 2018
 - Revised : 18 December, 2018
 - Accepted : 28 December, 2018