

해중림 조성을 위한 어초의 수리학적 특성

손 병 규

국립수산과학원 수산공학과

The Hydraulic Characteristics of Artificial Reefs Used to Construct Seaweed Beds

Byung-Kyu SOHN

Fisheries Engineering Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan 619-705, Korea

This study examined the stability of cross- and box-type artificial reefs used to construct seaweed beds. Theoretical and experimental studies have clarified the Froude similitude. However, basic data needed to develop a more stable design for artificial reefs must be collected from long-term studies and analyses of sliding caused by waves. Hydraulic experiments are important for solving problems in the design and construction of artificial reefs. This study examined some design parameters for artificial reefs under wave and currents. The results showed the stability of cross- and box-type artificial reefs for constructing seaweed beds using a dimensionless parameter (the surf similarity parameter), water particle velocity, and so on. The hydraulics experiment indicated that the stability of artificial reefs differed according to their method of installation. This implies that artificial reefs should be installed after considering various environmental factors, such as wave breaking, reflection, and sediments.

Key words: Artificial reefs, Stability, Hydraulics experiment, Design criterion, Surf zone

서 론

해조류는 해양생태계에서 1차 생산을 담당하는 기초 생물체로서 해양동물의 먹이가 되는 해양생물 자원이 될 뿐만 아니라, 해수의 영양염 등을 직접 흡수하여 수환경에 영향을 미치는 조절자 역할을 한다 (Lee, 1999). 최근, 지구온난화에 의한 수온상승으로 갯녹음 현상이 진행되어 해조류의 종 조성이 감소하고 있으며, 연안개발, 수온상승 등으로 갯녹음 현상이 심화된다면 연안 생태계가 단순화되고 해조류의 종 조성과 현존량이 감소될 것이므로, 갯녹음 진행속도를 늦추는 방안과 대안이 절실하다 (Choi et al., 2006). 한편, 연안역이 오염되지 않은 곳에는 바다속의 압초에 해조류가 많이 부착하고 있으며, 어류가 군집하고 있기 때문에 평탄한 해저보다도 생물적 다양성이 존재하며, 양적으로도 많은 생물이 분포하고 있다. 이와 같이 연안역에 다양한 생물이 서식하도록 정부에서는 지난 30여년 동안 각 해역에 어초를 시설하고 있으며, 이에 대한 효과 및 성과가 많이 달성되고 있다 (Ryu, 1992). 인공어초를 설치하면 부착생물이 착생을 하고, 플랑크톤과 어류가 군집해서 새로운 생태계가 형성되며, 인공어초에 다양한 생물이 서식하는 것은 이들 생물에게 먹이장소, 피난장소, 산란장소 등의 적합한 환경요인을 제공하기 때문이다. 최근에는 어류용 어초 대신 패조류용 어초가 연안역에 설치되고 있으나, 패조류용 어초의 시설수심은 약 15 m 전후로서 태풍이나 폭풍파 등 설계외력에 대한 안정성은 실험적으로 검토된 바는

드물다. 또한 우리나라 주변해역은 해역별 파랑의 분포가 크게 다르고 (FA, 1988), 한반도 주변에 기후변화로 인해 해수면의 높이도 미약하나마 증가되고 있을 뿐만 아니라 연안역의 설계파 제원의 설정도 재고되고 있는 실정이다 (FA, 1989; Lee and Jun, 2006). 따라서, 본 논문에서는 국립수산과학원 2차원 조파수조를 이용하여 수심 10 m, 15 m를 기준으로 파랑과 흐름을 변화시켜 해중림 조성을 위한 해조류용 어초의 안정조건이 되는 한계치를 구하여, 설계외력 (파랑, 흐름 등)의 안정조건을 어초의 수산토목공학적인 측면에서 제시하고자 한다.

재료 및 방법

실험장비 및 모형제작

본 실험에 사용된 실험장비는 2차원 조파기, 측정장치로는 용량식파고계 (CH401, Kenek Co.), 프로펠러형 유속계 (VO-301DK, Kenek Co.) 사면계 (WHT-100, Kenek Co.) 등이 있다. 2차원 조파수조는 파랑 및 유동장에서 행할 수 있는 부유식 또는 착저식 구조물의 유체력 및 파력 연구에 사용할 목적으로 1개의 풀러저형 조파기에 의해 규칙파, 불규칙파를 생성할 수 있고, 흐름을 재현할 수 있도록 설계되어 있다. 수조의 규모는 길이 30 m, 폭 1.0 m, 높이 1.2 m이며, 수조내에 발생하는 최대유속은 0.36 m/s이고, 생성 파랑은 규칙파의 경우 주파수 0.3-2.0 Hz, 최대파고 0.3 m로 설계되어 있으며, 불규칙파의 생성 스펙트럼은 JONSWAP, Neumann, Pierson & Moskowitz

*Corresponding author: bksohn@nfrdi.re.kr

등이 있다. 2차원수조의 해저면 경사는 천수 효과를 고려하여 1/40으로 제작 설치하였으며, 마찰계수를 고려하여 콘크리트 바닥재를 설치하여 어초의 안정성 실험을 수행하였다 (Ryu and Kim, 1994). 수조의 특성 및 어초의 크기, 실험과의 제원, 조파기의 성능 등을 고려하여 어초 모형의 축척은 1/40으로 결정하였으며 (Ryu et al., 1986), 크기 및 중량은 측정오차를 2% 이내에 들도록 제작하였고, 실험대상 어초의 형태는 Fig. 1과 같다. 그림과 같이 어초의 크기는 십자형 3.0×3.0×0.5 m³ (가로×세로×높이), 상자형 3.0×3.0×0.75 m³이며, 용적은 십자형 1.896 m³, 상자형 2.267 m³, 중량은 십자형 4.55톤, 상자형 5.44톤, 단위체적중량은 각각 2.4 t/m³이다.

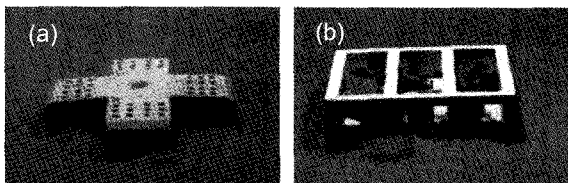


Fig. 1. Artificial reefs for the construction of seaweed beds: (a) cross-typed artificial reefs with the dimensions of 3.0×3.0×0.5 m³ (transverse×longitudinal×vertical) and (b) box-typed artificial reefs with the dimensions of 3.0×3.0×0.75 m³ (transverse×longitudinal×vertical).

수리모형실험

입사파랑이 어초설치 사면상에 도달하면 천수, 굴절 등에 의해 흐름이 발생함에 따라 어초의 형상에 따라 축류, 와류 등이 발생하게 된다 (Ryu and Kim, 1994). 그래서 어초의 안정성을 논의할 때, 안정성에 미치는 영향인자로서 해저경사면상의 흐름특성을 파악하여 활동과 전도특성을 파악하고자 하였다. 즉, 어초의 활동, 전도는 이러한 흐름에 의해서 야기된다고 판단된다. 우선 어초설치 사면상의 최대수립자속도의 입사파 특성 및 어초 특성(해저경사, 사면의 조도, 공극율 등)에 의한 변화를 분명히 해준다. 여기서 말하는 어초 사면상의 최대수립자속도 (V_{max})는 어초 설치지점에서의 수립자속도 분포의 최대를 나타내는 것이고, 이 V_{max} 의 무차원량 V_{max}/\sqrt{gH} 는 차원해석에 의해 다음과 같이 다양한 무차원량에 의해 좌우된다고 생각된다. 그리고 최대수립자속도 V_{max} 는 본 연구에서 대상으로 하고 있는 어초 주변의 흐름 발생 메카니즘과 어초의 안정성을 검토하는데 이용하였다.

$$\frac{V_{max}}{\sqrt{gH}} = f(H/h, \tan\theta/\sqrt{H/L}(=\xi), h/L, H/L, \theta, e) \quad (1)$$

여기서, ξ 는 Battjets (1974)가 제안한 surf similarity parameter이고, H 는 입사파고, L 은 파장, h 는 어초 설치지점에서의 수심, θ 는 해저경사, e 는 어초의 공극율, g 는 중력가속도이다. 본 실험에서는 다른 힘보다는 중력 성분이 탁월하고 점성의 영향은 무시할 수 있으므로 Froude 상사법칙을 사용하였다.

실험조건 및 방법

입사파랑 조건은 인공어초시설사업집행 및 관리규정 (MOMAF, 2004)에 의해 패조류용 어초의 설계수심이 15m인 점을 감안하여 2차원조파수조의 조파특성과 어초 설치해역의 설계파 조건은 Table 1과 같이 설정하였으며, 파랑의 불규칙성을 고려하여 불규칙파 및 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 실험을 수행하였다. 어초 모형의 설치지점에서의 수심을 현지수심 15m 및 10m에 해당되는 37.5cm, 25cm로 상정하였다. 현지해역의 조류에 의한 유속은 약 1.0m/sec, 2m/sec로, 축척비를 고려하여 실험실에서는 16cm/sec 및 어초의 한계 설계유속인 32cm/sec를 각각 고려하여 실험을 수행하였다. 어초의 안정성 등에 대한 주 영향인자의 해석을 위해 Fig. 2와 같이 계측장비를 배치하였으며, Fig. 3은 이동상 실험시 이용된 아래의 입도분포 곡선을 나타낸 것이며, 중앙입경은 약 0.2mm로서 세사 (fine sand)에 해당한다. 한편, 어초의 형상은 Fig. 4와 같이 수조의 길이방향으로 십자형, 상자형을 배치하여, 이동상 실험시 어초 전후 중앙선을 2cm 간격으로 어초 주변의 지형변동을 사면계로 측정하였다. 각각의 실험이 종료되면, 유실되었다고 여겨지는 양만큼 동일한 저질로 보충하고 기반을 평형하게 고른 후 어초를 설치하여 다음 실험을 수행하였다. 기본적으로 반복실험을 수행하여 실험에 의한 오차를

Table 1. Experimental conditions for wave and current fields

Scale (1:40)	Physical parameters	Value
Wave conditions (Irregular waves)	H _{1/3} (cm)	7.17-18.13
	T _{1/3} (sec)	1.01-2.32
	Spectrum	JONSWAP
	depth (cm)	37.5, 25
current conditions	V (cm/sec)	31.39-32.07
	V (cm/sec)	16.02-16.25
Artificial reefs conditions	Cross-typed AR (g)	71.1
	Box-typed AR (g)	116.3
Bottom conditions	Fixed, movable bed	
	Slope	1:40
	Wave number	1,000

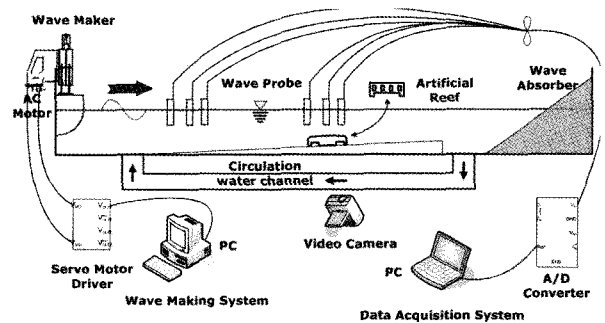


Fig 2. Experiment layout to investigate the sliding and overturning of the artificial reefs. The scour of the artificial reefs & the sediment deposit around artificial reefs were also investigated through the layout for the experiment with the movable bed.

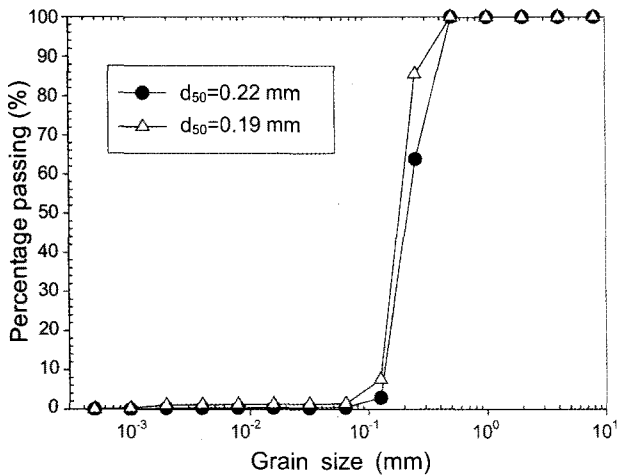


Fig. 3. Accumulation curve for grain size used by the hydraulic experiment at the movable bed.

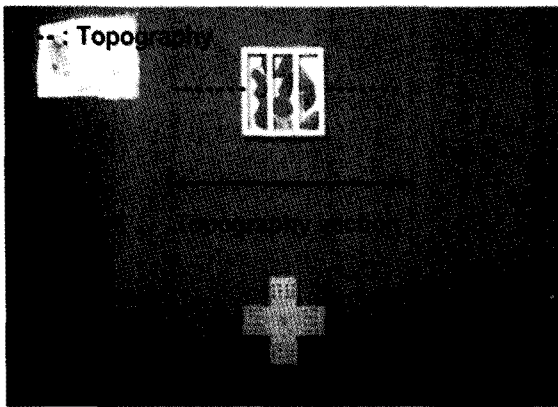


Fig. 4. The plan view of the artificial reefs in the experiment and their topography section.

최소화하였으며, 약 200 case의 실험을 수행하였다. Fig. 5의 경우, 실험조건 가운데 대표적인 case에 해당하는 파랑스펙트

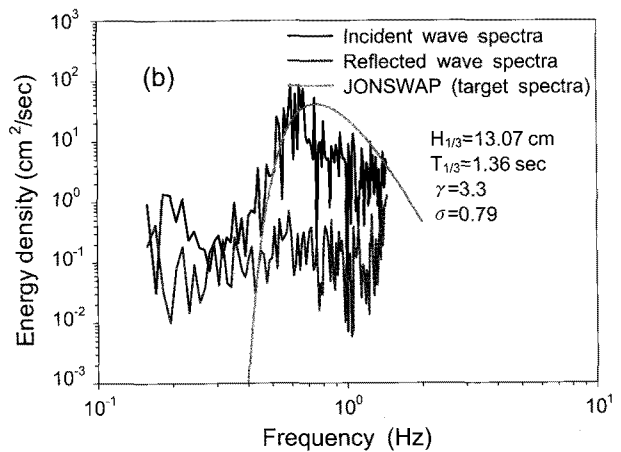
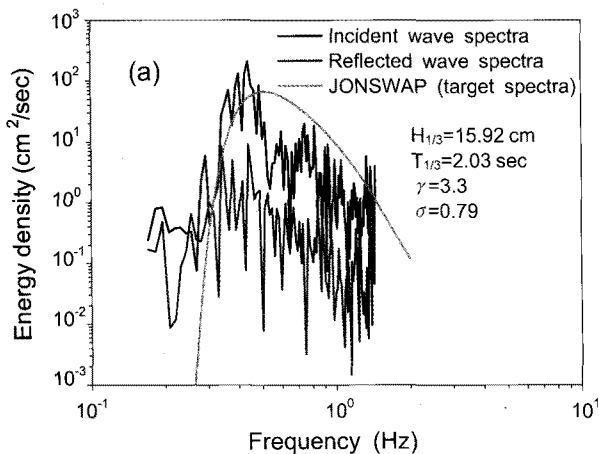


Fig. 5. Wave spectra in the case of 37.5 cm water depth (a) and 25 cm water depth (b). Three spectra (incident wave, reflected wave, and target) are shown in the figure.

럼 해석결과를 나타낸 것으로, 입사파주기의 피크치와 실험치와는 큰 차이는 없는 것으로 나타났다 (Goda and Suzuki, 1976). 따라서 이들 입사파조건을 실험시 입력 스펙트럼으로 각각의 파고와 주기를 변화시켜 조파기 입력함수로 사용하여 실험을 수행하였다. 또한, 수조내 어초 주변의 유황을 해석하기 위하여 프로펠러 유속계를 각각 2대 설치하였으며, 수조에서 발생하는 흐름 및 수립자속도의 재현성은 비교적 양호하였다 (NFRDI, 2007). 입사파랑별, 입사파주기별 및 유속별 측정 데이터를 취득하여 어초의 안정성과 관련하여 무차원량으로 검토하였다. 유속의 변화는 흐름장에서의 유속, 파동장에서의 수립자속도 및 파·흐름 공존장에서의 합성유속을 기준으로 실험하였고, 파동장에서는 태풍이나 폭풍파의 지속시간을 3시간으로 가정하고, 실험시간은 30분으로 하였고, 파·흐름 공존장에서도 실험시간을 30분으로 상정하여 실험하였으며, 필요한 경우 다양한 각도에서 사진 및 비디오 촬영을 하였다.

결과 및 고찰

Morison 식에 의한 어초의 활동, 전도

수중구조물을 해저에 침설시킨 후, 파와 흐름에 의해 전도되거나 활동하거나 혹은 세굴이나 매몰이 발생되어서는 안된다 (Goda, 1985). 이를 위한 계산법은 Morison 등에 의해서 제안된 식 (2)와 같이 파력은 물입자 속도에 의한 항력 (drag force)과 물입자의 가속도에 의한 관성력 (inertia force)과의 선형적인 결합으로써 표시되고 있다. 이 계산식은 이론적으로 문제가 남아 있지만, 실질적으로는 거의 타당한 결과를 주는 것으로 인정되고 있다 (Horikawa, 1979).

$$F = \frac{C_D A u_0}{2g} u^2 + \frac{C_M V u_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, 우변 제 1항은 흐름의 항력이고, 제2항은 관성력이다. u 는 파랑에 의한 유속이며, A 는 어초의 투영면적, V 는 어초의 실용적, u_0 는 어초의 단위체적중량, g 는 중력가속도를

각각 나타낸다. 해중립 조성을 위한 어초의 경우, 조류력 1 m/sec, 수심 10 m, 15 m, 항력계수 (C_D) 2.0, 관성력계수 (C_M) 2.0, 마찰계수 0.5, 투영면적은 1.26 m² (십자형), 1.47 m² (상자형), 설계파고 6.0 m, 주기 12.0 sec로 주어질 때, 활동은 1.4-1.6, 전도는 5.7-9.7로 각각 나타났다. 그러나, 어초의 이론적인 검토는 어초의 형상계수 (∇), 마찰계수 (μ), 항력계수 (C_D), 관성력계수 (C_M) 등 각 계수값들의 정의에 대해 고찰이 필요하며, 어초에 적합한 각각의 계수값을 이론적 또는 실험 등을 통하여 적용하여야 할 것으로 사료된다.

고정상에서의 어초의 안정성

어초의 안정성을 논할 때 외력(파랑, 흐름 등)에 의한 이동을 활동이라고 하며, 파동장의 경우 상술한 실험조건에 따라 실험을 수행한 결과, Fig. 6과 같이 무차원 최대수립사속도와 surf similarity parameter ξ 로 각각 나타내었다. 이들 결과 가운데, \odot 로 표시된 부분이 활동이 일어난 경우이며, 이때 입사파고 5.73 m, 주기 10.88 sec, 수심 10 m이었으며, 상자형의 경우 약 12-13 cm (현장치 4.8-5.2 m) 정도 이동되었으나, 십자형의 경우에는 미약한 움직임만 있었다. 무차원 최대수립사속도가 커질수록 어초에 미치는 유체력이 Morison식과 같이 커지며, 상대수심이 일정하면 surf similarity parameter ξ 의 값이 작아질수록 어초의 활동 범위가 주어질 것으로 생각되며, 즉, 상대수심이 비슷한 구간에 활동과 비활동으로 구분되는 것은 파형경사에 의해 부분쇄파의 발생여부와 상관이 있는 것으로 생각된다. Fig. 7은 주어진 실험조건에서 KC수와 Re수의 관계를 나타낸 것이며, 활동이 일어난 case는 Re수 9.2×10^6 , KC수 14일 경우이며, KC수와 Re수가 증가하면 어초가 불안정하게 되지만, 활동이 일어난 영역외에 비활동 영역은 어초 설치수심이 쇄파대의 위치에 있고, 파형경사 (H/L)가 클수록 쇄파가 발생하는 경향이 있으므로, 쇄파에 의한 에너지 감쇄 등 비선형성에 기인되는 것으로 판단된다. Fig. 8은 활동이 발생한 case에 해당되며 어초의 초기위치와 이동된

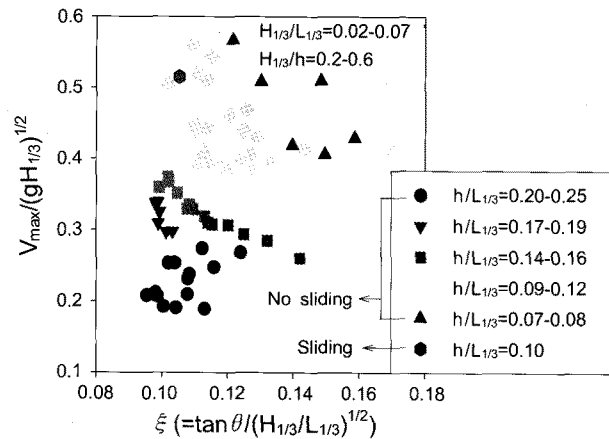


Fig. 6. The relation between the maximum particle speed (V_{max}) and surf similarity parameter (ξ), which shows the stability of the artificial reefs.

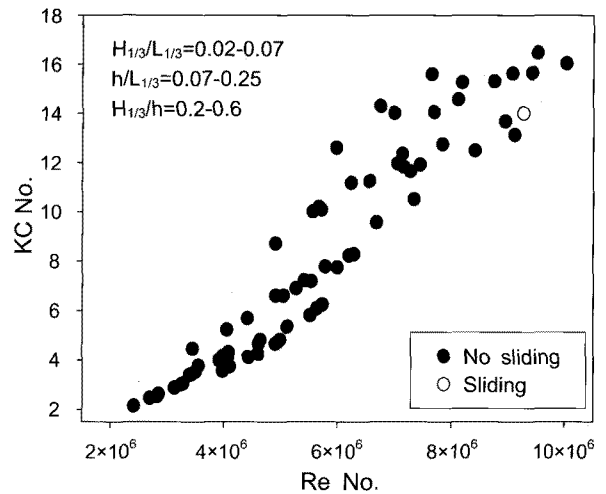


Fig. 7. The relation between the Keulegan-Carpenter number (KC No.) and Reynolds number (Re No.), which shows the stability of the artificial reefs.

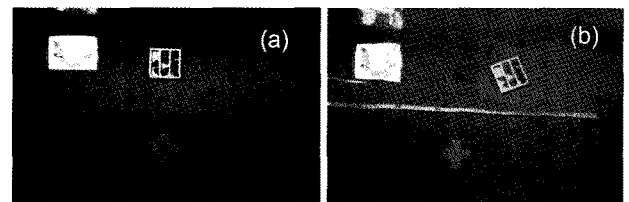


Fig. 8. The plan views of the artificial reefs at the initial stage (a) and the final stage (b) of the experiment. From the views, the stability of the artificial reefs was observed in the wave field.

위치를 각각 나타낸 것이다. 전술한 실험조건에 대해 1 case 외엔 활동이 발생하지 않는 것은 어초의 형상이 어초 설치 수심대에서는 안정성을 유지하는 것으로 판단된다. 실험 파랑은 모두 불규칙파로서 파랑의 통계적 특성 중 최고파의 개념으로 설계할 것인지, 유의파의 1.5-1.8배의 개념으로 설계할 것인지에 대해서는 지속적인 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 한편, 흐름장의 경우, 두 가지 어초 모두 설계유속 2 m/sec에 상당하는 유속을 주었을 때, 활동과 전도는 발생하지 않았다. 전술한 Morison식에 의한 안전율과 수리실험결과와 다소 차이가 나는 것은 어초의 형상 및 영향인자의 적용성에 기인하는 것으로 판단된다.

파동장에서 활동이 일어나는 대표적인 실험 case와 전술한 바와 같이 설계유속에 상당하는 흐름에서 활동이 일어나지 않았으므로, 설계유속과 활동이 발생하는 실험 case를 조합하여 수심 10 m, 15 m일 때 어초의 안정성을 검토하였다. Fig. 9는 파·흐름 공존장에서 활동이 발생한 대표적인 실험 case를 나타내었으며, 이때 입사파고 5.00 m, 주기 12.46 sec, 수심 10 m 및 유속 2 m/sec 일 때 약 7-8 cm (현장치 2.8-3.2 m) 내외로 활동이 일어났다. 한편, 수심 10 m 일 때, 입사파고 4.52 m, 주기 12.9 sec, 입사파고 4.43 m, 주기 9.55 sec와 유속 2 m/sec인 파·흐름 공존장에서는 어초의 활동이 발생하지 않았

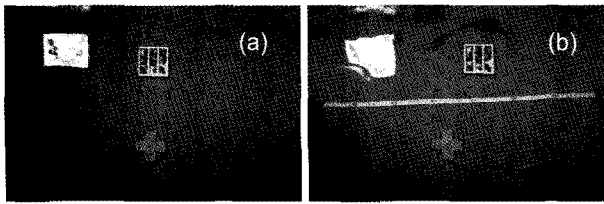


Fig. 9. The plan views of the artificial reefs at the initial stage (a) and the final stage (b) of the experiment. From the views, the stability of the artificial reefs was observed in the wave and current fields.

으며, 수심 15 m 일 경우에는 전술한 실험조건 내에서는 활동이나 전도가 발생하지 않았다. 따라서, 이들 값이 파·흐름 공존장에서 어초의 안정성에 대한 한계값으로 추정된다.

이동상에서의 어초 지형변동

이동상에서의 어초 지형변동은 전술한 실험조건에 따라 파동장, 흐름장 및 파·흐름 공존장에 대해 실험을 수행하였으

며, 수심 15 m의 경우에는 고정상에서는 활동 및 전도는 발생하지 않았으므로, 본 논문에서는 모두 수심 10 m의 경우에 대한 결과만 제시하고자 한다. 사면계를 이용하여 얻어진 각각의 지형변동은 Fig. 10과 같이 어초 전면은 실험조건에 따라 세굴패턴과 퇴적패턴이 나타나는 현상이 나타났으며, 어초의 배후면은 전형적인 퇴적패턴이 두드러졌다. 특히, 흐름장의 경우, 어초 전후면의 지형변동은 크지 않으나, 어초 기초부의 세굴현상은 후술하는 실험결과와 같이 어초 전면 기초부 하단은 세굴량이 점차 증가하는 현상을 볼 수 있으며, 축류에 의해 저질의 이동을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 설계유속에 상당하는 흐름에 의해 발생하는 지형변화 패턴을 나타낸 것으로 어초의 측면부에서 발생하는 축류에 의한 지형변화는 많은 연구결과에서 볼 수 있는 전형적인 결과로 생각되며, 시간이 경과함에 따라 지형변동 영역이 확대되어가는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 어초의 형상에 따라 어초 배후면은 지형변동이 발생되지 않는 경우에 해당되며, 전술한

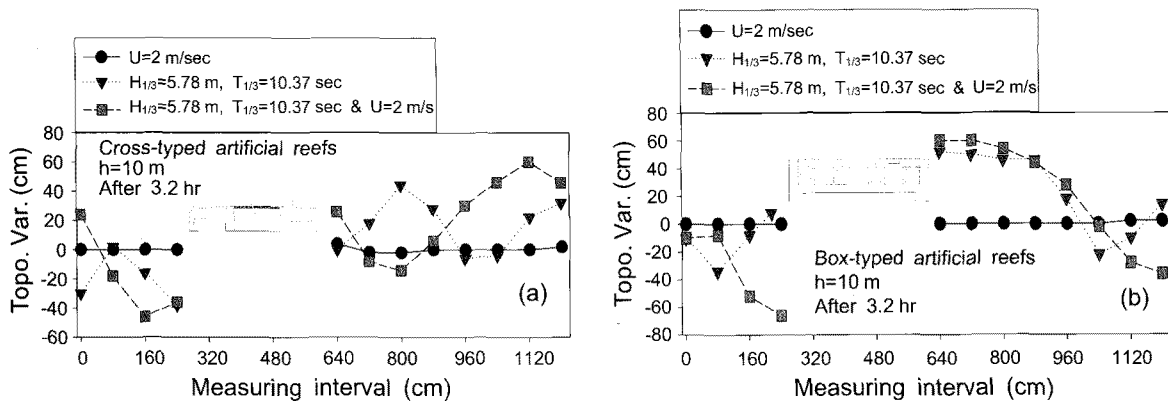


Fig. 10. The vertical topography variation of the cross-typed artificial reefs (a) and box-typed artificial reefs (b).

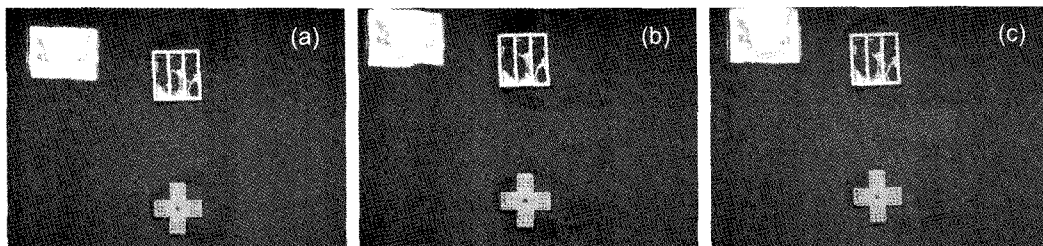


Fig. 11. The plan views of the scouring pattern of the artificial reefs in the current field at 10 minutes (a), 20 minutes (b), and 30 minutes (c).

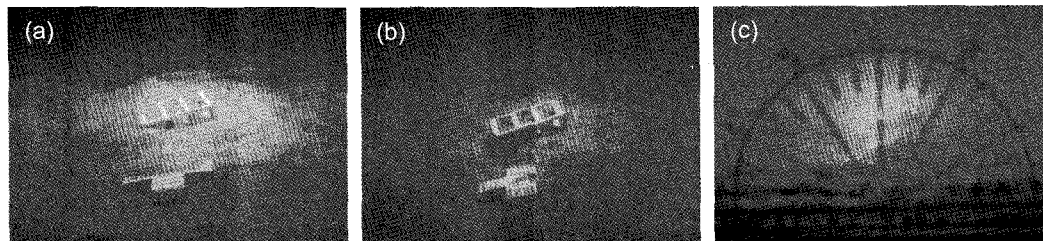


Fig. 12. The side views of the scouring pattern of the artificial reefs in the wave and current fields at 10 minutes (a), 20 minutes (b), and 30 minutes (c).

Fig. 10의 흐름장에서의 지형변동량과 같이 미약함을 확인할 수 있다. Fig. 12는 파·흐름 공존장의 경우에 발생한 어초의 지형변동 일례를 나타낸 것으로, 입사파고 5.78 m, 주기 10.37 sec 일 때 활동은 발생되지 않았으며, 시간이 경과함에 따라 어초 전면이 세굴되면서 조파기 방향으로 약 10-20° 기울어지는 현상이 발생되었으며, 또한 사련의 발달과 흐름에 의해 어초가 매몰되는 현상과 아울러 침하도 발생하였는데, 십자형의 경우 20-22 cm (현장치), 상자형의 경우 28-44 cm (현장치)로 측정되었다. 따라서, 어초의 시설적지를 선정할 때 저질의 특성을 고려하지 않을 수 없으며, 어초의 시설시 어초의 배치 문제도 간과해서는 안될 것으로 판단된다. 비록 가는 모래를 이용하여 이동상 실험을 수행하였고, 극치 외력에 상당하는 여러 가지 case에 대한 결과이지만, 쇄파대에 가까운 연안역인 15 m 전후에 어초를 시설할 경우에는 어초의 구조 및 부재의 형상 개량, 지반의 한계 소류력 증대법 등을 고려하여 국소세굴, 매몰 및 침하를 제어할 수 있을 것으로 사료되며, 어초의 집어 메카니즘의 하나인 와류, 축류 등을 감소시키는 작용이 발생하지 않도록 신중히 검토하여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 사업과제인 동해안 해조장 조성에 관한 연구 결과의 일부이며, 연구비의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Battjens, J.A. 1974. Surf similarity. In: Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. ASCE. Copenhagen, Denmark, 466-480.
- Choi, C.G., S.N. Kwak and C.H. Sohn. 2006. Community structure of subtidal marine algae at Uljin on the East Coast of Korea. *Algae*, 21, 463-470.
- FA. 1988. Estimation of Design Wave Height for East and South Sea. Fisheries Administration, Seoul, Korea, 13-230.
- FA. 1989. Estimation of Design Wave Height for Port and Harbour. Fisheries Administration, Seoul, Korea, 7-119.
- Goda, Y. 1985. Random Sea and Design of Marine Structures. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 1-323.
- Goda, Y. and Y. Suzuki. 1976. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. In: Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering. ASCE. Honolulu, USA, 828-845.
- Horikawa, K. 1979. Coastal Engineering. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 1-362.
- Lee, D.Y. and K.C. Jun. 2006. Estimation of design wave height for the waters around the Korean peninsula. *Ocean Sci. J.*, 41, 245-254.
- Lee, R.E. 1999. Phycology. Cambridge University Press, New York, USA, 12-28.
- MOMAF. 2004. The Execution & Management Rules for Artificial Reefs Facilities Project. Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, Seoul, Korea, 1-36.
- NFRDI. 2007. Report on the stability of pyramid-typed artificial reefs. National Fisheries Research & Development Institute, Busan, Korea, 17-18.
- Ryu, C.R., S.D. Chang and K.B. Lim. 1986. A study on the scale and the arrangement of artificial reefs. *Bull. Fish. Res. Dev. Agency*, 1-24.
- Ryu, C.R. 1992. Review on marine artificial habitat technology. In: Proceedings of the FOID '92, Korea, 137-154.
- Ryu, C.R. and H.J. Kim. 1994. A study on the characteristics of wave forces on artificial reefs. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 27, 605-612.

2007년 12월 12일 접수
2008년 6월 9일 수리