한국해양공학회지 제21권 제6호, pp 120-124, 2007년 12월 (ISSN 1225-0767)

패조류용 어초의 안정성에 관한 실험적 연구

손병규*
국립수산과학원 수산공학팀

An Experimental Study on the Stability of Artificial Reefs for Shellfish and Seaweed

BYUNG-KYU SOHN*
*Fisheries Engineering Division, NFRDI, Busan, Korea

KEY WORDS: Artificial reefs 인공어초, Stability 안정성, Hydraulic experiment 수리실험, Design criterion 설계기준, Sliding 활동

ABSTRACT: *The purpose of this study was to investigate the stability of the arched and fan types of artificial reefs, which provide habitatsfor shellfish and seaweed. According to the Froude similitude, parameters affecting the stability of the artificial reefs were analytically, experimentally studied. First, the design parameters of the artificial reefs in wave and current fields were presented. Then, using dimensionless parameters, such as the surf similarity parameter and water particle speed, the stability of the arched and fan types ofartificial reefs was investigated. From the hydraulic experiments, it is shown that the stability heavily depends on the way the artificial reefs are installed. Therefore, the installation of the artificial reefs on the surf zone should be carefully executed.*

1. 서 론

우리나라 주변 해역은 동해, 남해, 서해로 구분되며, 지리적인 형상 및 해양학적인 특성 등이 서로 상이하다. 또한, 파고는 풍속에 비례하여 증가하나 취송거리 및 취송시간 때문에 각 해역별로 파랑의 분포가 크게 다르다(수산청, 1988).
해마다 하계에 우리나라에 내습하는 태풍은 그 강도가 온대성 저기압과 비교할 때 매우 강하여 그 영향을 직접 받는 남해 전역과 서해 남부, 동해 남부 해상은 태풍에 의해 가장 큰 파랑이 발생한다. 최근 들어 한반도 주변에 기후변화로 인해 해수면의 높이도 미약하나마 증가되고 있을 뿐만 아니라, 연안역의 설계파 제원의 설정도 재고되고 있는 실정이다(수산청, 1989; 한국해양연구원, 2006).

연안역의 수산자원 감소로 인해 정부에서는 지난 30여년 동안 각 해역에 어초를 시설하고 있으며, 이에 대한 효과 및 성과가 많이 달성되고 있다(Ryu, 1992). 최근에는 어류용 어초 대신 해조류용 어초가 연안역에 설치되고 있으나, 이에 대한 안정성은 실험적으로 검토된 바는 드물다. 또한, "인공어초 시설사업 집행 및 관리규정(해양수산부, 2004)"의 인공어초 적지 및 효과조사 요령에 의하면 "패조류용 어초는 대상수심을 15m 이내를 원칙으로 한다"라고 되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 2차원 수조를 이용하여 수심 15m를 기준으로 파고, 주기, 흐름 등 파랑과 흐름을 변화시켜 패조류용 어초의 안정조건이 되는 한계치를 구하여, 설계외력(파랑, 흐름 등)의 안정조건을 어초의 수산토목공학적인 측면에서 제시하고자 한다.

교신저자 손병규: 부산시 기장군 · 읍 시랑리 408-1
051-720-2591 bksohn@nfrdi.re.kr

2. 수리모형실험

2.1 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 플런저형 조파기에 의해 규칙파, 불규칙파를 생성할 수 있고, 흐름을 재현할 수 있도록 설계되어 있다. 수조의 규모는 길이 30m, 폭 1.0m, 높이 1.2m이며, 수조내에 발생되는 최대유속은 0.36m/s 이고, 생성 파랑은 규칙파의 경우 주파수 0.3~2.0Hz, 최대파고 0.3m로 설계되어 있으며, 불규칙파의 생성 스펙트럼은 JONSWAP, Neumann, Pierson & Moskowiz 등이 있다.

2차원 수조의 해저면 경사는 천수변형의 효과를 고려하여 1/40으로 제작 · 설치하였으며, 마찰계수를 고려하여 콘크리트 바닥재를 설치하여 어초의 안정성 실험을 수행하였다(류청로와 김현주, 1994). 수조의 특성 및 어초의 크기, 실험파의 제원, 조파기의 성능 등을 고려하여 어초 모형의 축척은 1/40으로 결정하였으며(류청로 등, 1986), 크기 및 중량은 측정오차를 2%이내에 들도록 제작하였고, 실험대상인 아치형 어초와 부채꼴 사각어초의 형태는 Fig. 1 과 같다.

아치형 어초의 크기는 3.2×2.4×2.0m(가로×세로×높이)이며, 용적은 6.2m^3, 중량은 14.88ton, 단위체적중량은 2.4t/m^{3}이다. 부채꼴형 사각어초의 크기는 3.0×3.0×3.5m(가로×세로×높이)이며, 용적은 4.8m^3, 중량은 11.41ton, 단위체적중량은 2.4t/m^{3}이다.

2.2 주요 영향인자

입사파랑이 어초가 설치된 사면상에 도달하면 천수, 굴절 등에 의해 흐름이 발생함에 따라 어초의 형상에 따라 축류, 와류 등이 발생하게 된다(류청로와 김현주, 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 어초가 설치된 사면상에서 최대수립자속도의 입사파 특성 및 어초특성(해저경사, 사면의 조도, 공극율 등)에 의한 변화를 분명히 해둔다. 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.

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

여기서, ξ는 Battjets(1974)가 제안한 Surf similarity parameter 이고, H는 입사파고, L은 파장, h는 어초 설치지점에서의 수심, θ는 해저경사, e는 어초의 공극율, g는 중력가속도이다. 본 실험에서는 다른 힘보다는 중력 성분이 탁월하고 점성의 영향은 무시할 수 있으므로 Froude 상사법칙을 사용하였다.

2.3 실험조건

입사파랑 조건은 2차원 조파수조의 조파특성을 고려하여 Table 1과 같이 설정하였으며, 파랑의 불규칙성을 고려하여 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 불규칙파 실험을 수행하였다. 어초 모형의 설치지점에서의 수심을 현지 수심 15m 및 10m 에 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. 1과 같이 계측장비를 배치하였으며, 기본적으로 반복실험을 수행하여 실험에 의한 오차를 최소화하였으며, 약 200 Case의 실험을 수행하였다.

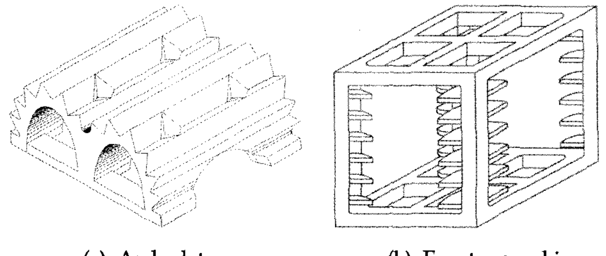

(a) Arched type (b) Fan type cubic

Fig. 1 Artificial reefs for shellfish and seaweed

Fig. 3과 Fig. 4의 경우, 실험조건 가운데 대표적인 Case에 해당되는 파랑스펙트럼 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. 한편, 아치형 어초의 경우, 정면과 측면의 형상이 다르므로 Fig. 5 (a)와 같이 설치하고, Fig. 5 (b)는 부채꼴 어초의 배치를 나타낸 것으로 중앙입경 0.2mm의 이동상 실험도 병행하여 수행하였다. 또한, 수조내 어초 주변의 유황을 해석하기 위하여 프로펠러 유속계를 각각 2대 설치하였으며, 입사파랑별, 입사파주기별 및 유속별 측정데이타를 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 비데오 촬영을 하였다.

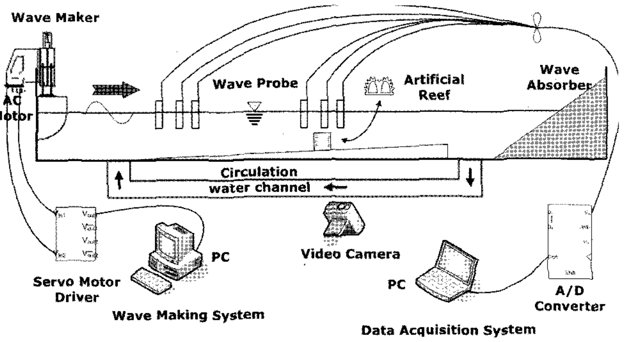


Fig. 2 Experiment layout

Table 1 Experimental conditions

Scale(1:40)	Physical parameters	Value
Wave conditions (Irregular waves)	$H_{1/3}$ (cm)	7.97~19.12
	$T_{1/3}$ (sec)	0.99~2.15
	Spectrum	JONSWAP
	Depth (cm)	37.5, 25
Current conditions	V (cm/sec)	31.39~32.07
	V (cm/sec)	16.02~16.25
AR conditions	Arched AR (g)	232.5
	Fan type AR (g)	178.3
Bottom conditions		Fixed, movable bed
	Slope	1 : 40
	Wave number	1000

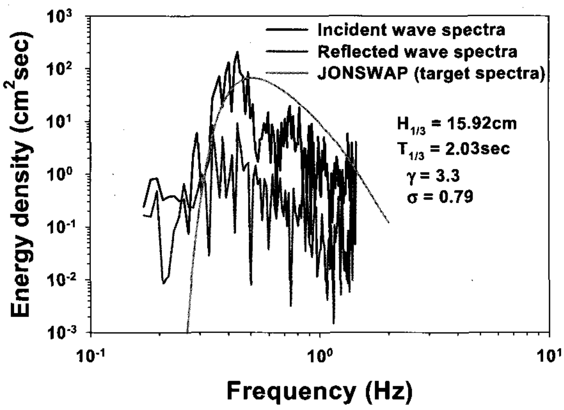


Fig. 3 An example of spectrum analysis (h = 37.5 cm)

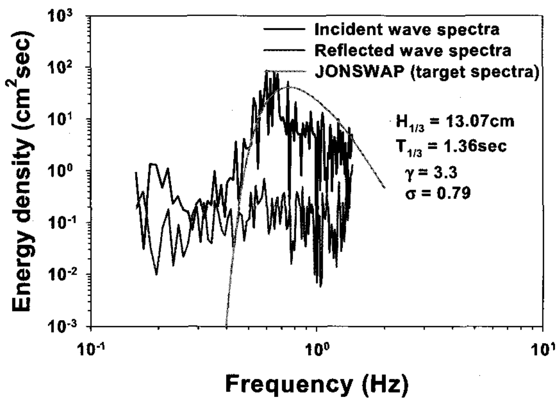
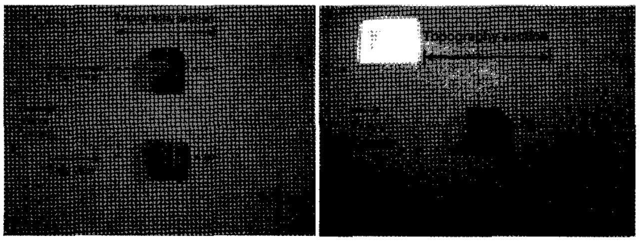


Fig. 4 An example of spectrum analysis (h = 25 cm)



(a) Arched (b) Fan type

Fig. 5 Artificial reefs arrangement

3. 수리모형실험 결과

3.1 Morison 식에 의한 어초의 활동, 전도

어초는 해저에 침설시킨 후, 파와 흐름에 의해 전도되거나 활동하거나 혹은 세굴이나 매몰이 발생되어서는 안된다(Goda, 1985). 이를 위해 다음과 같은 Morison 등에 의해 제안된 식으로 파력을 계산할 수 있으며, 파력은 양력을 무시할 만하다고 가정하면, 항력과 관성력의 합으로서 나타낼 수 있다. 이 계산식은 이론적으로 문제가 남아 있지만, 거의 타당한 결과를 주는 것으로 인정되고 있다(Horikawa, 1979).

$$F = \frac{C_D A w_0}{2g} u^2 + \frac{C_M V w_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \tag{2}$$

아치형 어초의 경우, 조류 1m/sec, 항력계수(C_D) 2.0, 관성력계수(C_M) 2.0, 마찰계수 0.5, 투영면적은 3.2m^2(정면), 4.1m^2(측면), 설계파고 6.0m, 주기 12.0sec로 주어질 때, 활동은 1.7~3.1, 전도는 1.4~1.9로 각각 나타났다. 부채꼴 사각어초의 경우, 투영면적 5.37m^2, 설계파고 5.0m, 주기 12.0sec 일때, 활동 1.3, 전도 1.1로 각각 나타났다. 아치형 어초의 활동, 전도에 대해 수심별로 각각 안정한 값을 나타내고 있으나, 부채꼴 사각어초의 경우에는 다소 불안정한 값을 나타내고 있다. 그러나, 어초의 이론적인 검토는 어초의 형상계수(∇), 마찰계수(μ), 항력계수, 관성력계수 등 각 계수값들의 정의에 대해 고찰이 필요하며, 어초에 적합한 각각의 계수값을 이론적 또는 실험 등을 통하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

3.2 어초의 안정성

아치형 어초의 경우, 어초 형상이 상술한 바와 같이 정면과 측면으로 나누어 실험을 수행하였으며, 파동장의 경우 상술한 실험조건에 따라 실험을 수행한 결과, Fig. 6과 Fig. 7과 같이 무차원 최대수립자속도와 Surf similarity parameter ξ 로 각각 나타내었다.

이들 결과 가운데 ■로 표시된 부분이 활동이 일어나는 경우이며, 무차원 최대수립자속도가 커질수록 어초에 미치는 유체력이 Morison식과 같이 커지며, 상대수심이 일정하면 ξ의 값이 작아질수록 어초의 활동 범위가 나타나고 있다. 즉, 상대수심(h/L)이 비슷한 구간에 활동과 비활동으로 구분되는 것은 파형경사에 의해 부분쇄파의 발생여부와 상관이 있는 것으로 생각된다. 이는 어초 설치수심이 쇄파대의 위치에 있고, 파형경사(H/L)가 클수록 쇄파가 발생하는 경향이 있으므로, 쇄파에 의한 에너지가 감쇄 등 비선형성에 기인되는 것으로 판단된다. 어초의 배치에 따라 활동의 패턴이 달랐으며, 이론적인 검토와는 달리 어초 정면의 활동에 대한 안정성이 측면보다 불안정하였다.

부채꼴 사각어초 또한 수심 15m에 대해서 검토하였으며, 어초의 활동 범위(○, ▽, □)는 상대수심이 비슷한 경우 Surf similarity parameter ξ가 작아지면 Fig. 8과 같이 활동이 일어나는 것으로 나타났다. 전술한 아치형 어초의 경우와 마찬가지로 쇄파에 의한 에너지 감쇄 등 비선형성 등에 의해 활동의 폭이 차이가 발생하는 것으로 생각된다. 특히, 실험 파랑은 모두 불규칙파로서 파랑의 통계적 특성중 최고파의 개념으로 설계할 것인지, 유의파의 1.5~1.8배의 개념으로 설계할 것인지에 대해서는 지속적인 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

한편, 흐름장의 경우, 두가지 어초 모두 설계유속 2m/sec에 상당하는 유속을 주었을 때, 활동과 전도는 발생하지 않았다. 전술한 Morison식에 의한 안전율과 수리실험결과와 다소 차

이가 나는 것은 어초의 형상 및 영향인자의 적용성에 기인하는 것으로 판단된다.

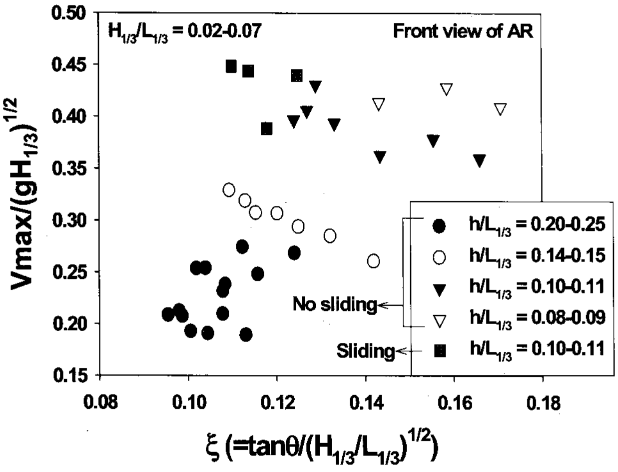


Fig. 6 The stability of arched AR (Front view)

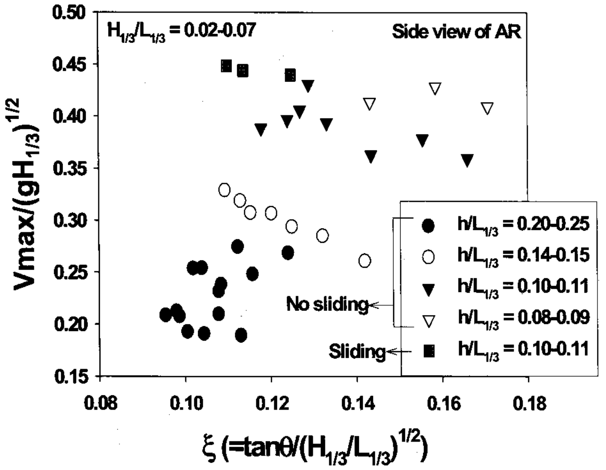


Fig. 7 The stability of arched AR (Side view)

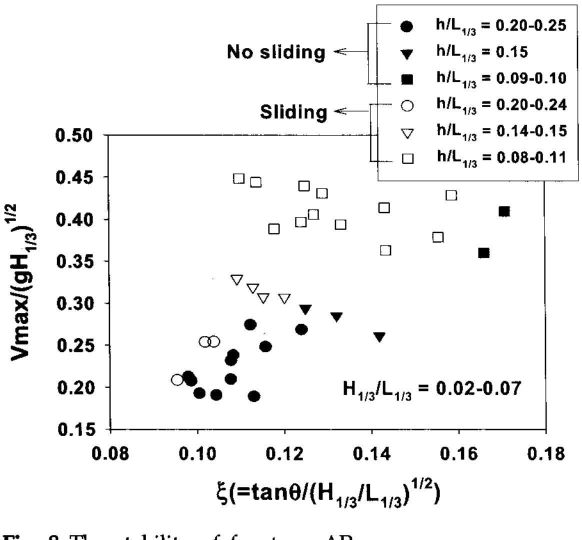
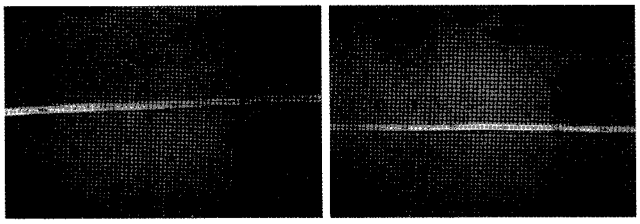


Fig. 8 The stability of fan type AR



(a) Arched type (b) Fan type cubic

Fig. 9 An example of sliding AR

3.3 파 · 흐름 공존장에서의 어초 활동, 전도

파 · 흐름 공존장에서서 아치형 어초가 활동이 발생한 일례는 Fig. 9 (a)와 같이, 입사파고 5.89m, 주기 12.52sec 및 유속 2m/sec 일때 약 30cm(현장치 12.0m) 내외로 일어났다. 이와 같이, 설계유속과 활동이 발생하는 실험 Case를 조합하여 수심 10m, 15m일 때 어초의 안정성을 검토한 결과, 수심 10m 일 때, 입사파고 5.89m, 주기 12.52sec와 유속 1m/sec인 파 · 흐름 공존장에서는 어초의 활동이 발생하지 않았으며, 수심 15m일 때, 입사파고 5.73m 주기 13.03sec와 유속 2m/sec 인 파 · 흐름 공존장에서 어초의 활동은 발생하지 않았다. 이들 값이 파 · 흐름 공존장에서 어초의 안정성에 대한 한계값으로 추정되어진다.

부채꼴 사각어초의 경우, Fig. 9 (b)와 같이 입사파고 3.56m, 주기 9.3sec 및 유속 2m/sec일 때 활동이 일어났다. 전술한 바와 같이 실험 case를 조합하여 어초의 활동 한계치를 추정한 결과, 수심 15m일 때, 입사파고 1.6m, 주기 12.71sec, 파고 1.88m, 주기 15.43sec, 파고 2.22m, 주기 12.9sec에 해당되는 3가지 경우와 설계유속에 상당하는 흐름 2m/sec인 파 · 흐름 공존장에서 실험을 각각 수행하였을 때, 시험어초의 활동은 발생하지 않았으며, 이들 값이 구하고자 하는 한계값으로 생각된다.

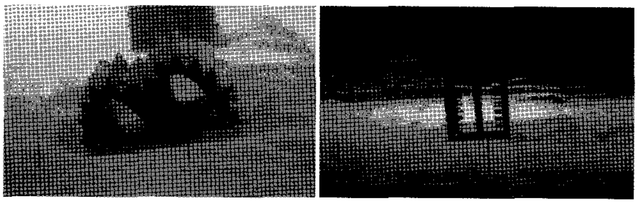
3.4 이동상에서의 어초 지형변동

전술한 실험조건에 따라 설계유속과 설계파에 상당하는 외력에 대해 흐름장과 파동장에서 어초의 세굴 · 침하와 같은 지형변동은 사면계를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 10은 설계유속에 상당하는 흐름을 주었을 때, 어초의 형상에 의해 지형변화가 일어나는 것을 각각 나타낸 것이다. 이는 어초 주위의 축류와 와류에 의해 발생된 것으로, 형상에 따라 다른 것을 알 수 있으며, 어초 전면은 세굴이 발생되었다. Fig. 11은 Fig. 10과 같이 설계유속에 대한 어초의 지형변동 패턴을 나타낸 것으로 축류 및 와류에 의한 지형변화는 많은 연구결과에서 볼 수 있는 전형적인 결과로 생각된다. 아치형 어초의 전면은 세굴이 발생될 뿐만 아니라 조파기 방향으로 약 20° 정도 기울어지기도 하였다. 부채꼴 어초 또한 세굴이 발생되었으며, 조파기 방향으로 약 5° 정도 기울고, 침하되었다. Fig. 12는 파동장에서의 지형변동 패턴을 나타낸 것으로 아치형 어초의 경우, 어초 전면에 세굴이 발생되고, 시간이 지남에 따라 세굴량이 증가하면서 어초가 조파기 방향

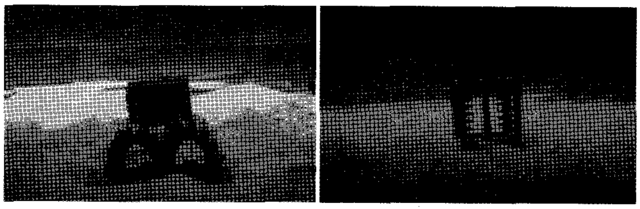
(a) Front view (b) Side view (c) Fan type

Fig. 10 Topography variation around Artificial reefs (after 30min)



(a) Arched (b) Fan type

Fig. 11 Scouring at the toe of the artificial reefs (design current)



(a) Arched (b) Fan type

Fig. 12 Scouring at the toe of the artificial reefs (design wave)

으로 약 10° 정도 기울었으며, 부채꼴 어초의 경우, 파랑에 의해 발생된 사련에 따라 어초 주변의 지형변동에 영향을 주며, 활동 및 침하도 발생되었다. 이동상 실험은 대부분 어초 전면이 유체력과 파력에 의해 세굴되면서 10°~30° 내외로 기울어지면서 침하하는 현상이 반복되었다. 따라서, 패조류용 어초의 시설적지를 선정할 때 저질의 특성을 고려하지 않을 수 없으며, 비록 가는 모래(중앙입경 0.2mm)를 이용하고, 설계외력에 상당하는 여러 가지 Case에 대한 결과이지만, 사질에 어초를 설치할 경우, 어초의 세굴·침하 발생에 대한 보완 대책 및 어초의 구조변경 등의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 아치형 및 부채꼴 어초의 안정성 평가를 위해 Froude 상사법칙을 적용한 고정상 및 이동상 수리모형실험을 수행하였으며, 설계외력(파랑, 흐름 등)에 상당하는 조건에 따라 이론적/실험적 검토를 하였다. 어초의 이론적인 안전율과 실험적인 결과와는 차이가 발생하고 있으며, 이는 어초의 형상과 항력계수, 관성력계수 및 어초의 배치에 따른 것으로 판단되며, 어초의 형상에 따른 양력을 고려하지 않는 문제점도 있을 것으로 생각된다. 고정상의 경우, 무차원최대수립자속도와 Surf similarity parameter를 이용하여 어초의 활동 범위를 나타낼 수 있었으며, 이동상의 경우, 패조류용 어초는 활동과 침하 등 어초전면에 세굴이 발생하면서 기울어지는 현상이 발생하였다. 따라서, 사질대에 어초를 시설할 경우에는 어초의 세굴, 침하 발생에 대한 보완대책을 마련하여야 할 것이다. 마지막으로 어초를 현장에 시설하기에 앞서, 이론적인 검토 뿐만 아니라, 실험적인 검토를 통해 어초의 안정성이 확보된 후에 시설하는 것이 바람직하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 세강건설(주), 태화건설(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구결과중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

류청로, 김현주 (1994). "착저식 인공어초에 작용하는 파력특성에 관한 연구", 한국수산학회지, 제27권, 제5호, pp 605-612.

류청로, 장선덕, 임기봉 (1986). "인공어초의 규모 및 배치에 관한 연구", 수진연보, 제38권, pp 1-24.

수산청 (1988). 해역별(동해·남해) 심해파 추정 보고서, pp 281.

수산청 (1989). 어항 설계 천해파 추정 보고서, pp 209.

한국해양연구원 (2005). 전해역 심해설계파 추정보고서, pp 302.

해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준.

해양수산부 (2004). 인공어초시설사업집행 및 관리규정.

Battjets, J.A. (1974). "Surf Similarity", Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp 466-480.

Goda, Y. (1985). Random Sea and Design of Marine Structures, University of Tokyo Press, pp 323.

Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments", Proc. 15th Conf., Coastal Eng., Honolulu, pp 828-845.

Horikawa, K. (1979). Coastal Engineering, University of Tokyo Press.

Ryu, C.R. (1992). "Review on Marine Artificial Habitat Technology", Proc. FOID '92, pp 137-154.

2007년 11월 20일 원고 접수
2007년 12월 7일 최종 수정본 채택