

비정상 흐름-파랑 공존장의 인공어초 침하특성에 관한 연구

윤상준 · 김헌태
부경대학교 해양공학과

A Study of Artificial Reef Subsidence in Unsteady Flow-Wave Field

SANG-JOON YOON AND HEON-TAE KIM

Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

KEY WORDS: Artificial reef 인공어초, Scour 세굴, Subsidence 침하, Unsteady flow 비정상 흐름, Shields number 쉴즈 수, Long-term subsidence 장기 침하

ABSTRACT: The experimental studies for the artificial reef (AFR) subsidence characteristics in the unsteady flow field and in the unsteady flow-wave field were carried out. The difference of scour/subsidence characteristics between in the steady flow field and in the unsteady flow field was discussed and also the long-term subsidence characteristics in the unsteady flow field were investigated. AFR subsidence characteristics was discussed with Keulegan-Carpenter number (KC), Reynolds number (Re^*), Shields number (Sn^*) and dimensionless time (t/Ti). And the difference of subsidence characteristics between in the unsteady flow field and in the unsteady flow-wave field was discussed.

1. 서 론

최근 더욱 거세지는 무역자유화의 바람으로 세계 각국에서는 천연자원뿐만 아니라 첨단기술, 산업인력 및 환경까지도 국가 생존을 위한 도구가 되고 있다. 이러한 상황에서 각 해양국가들은 친환경적 연안개발과 함께 EEZ를 선포하여 자국의 수자원을 보호하고 연안해양 수산자원의 지속적 생산극대화가 가능하도록 하기 위해 수산자원의 개발, 적정 이용과 관리방안 수립에 대한 연구를 다방면으로 하고 있는 실정이다. 특히 최근의 한·중·일 어업협정으로 인하여 근해역이 좁아지면서 연안어업자원에 대한 의존도는 더욱 높아지고 있을 뿐만 아니라, 연안의 오염가중, 양식어업의 증가로 인한 부작용 등으로 연안어장의 생산성 저하는 날로 심각해지고 있어 연안어장의 보전 및 자원증대의 필요성이 절실한 시기이다. 이 때문에 우리 정부에서도 연안어장 조성을 위하여 매년 막대한 자금을 들여 인공어초 사업을 지속적으로 펼치고 있다(해양수산부, 2000).

한편, 지금까지 인공어초에 대한 연구는 기능성과 안정성에 관해 많은 연구가 수행되었으며, 최근 기능성에 관하여 국립수산진흥원(1992)을 비롯하여 다양하게 국내외로부터 보고되고 있다. 인공어초에 있어서 이러한 기능적 차원의 설치효과 극대화를 위해서 해역의 수리학적 특성을 조사하고, 대상종 선정 및 그 생태학적 특성을 면밀히 고려하여 적절한 형태 및 재질의 어초를 설정하는 것은 물론 시설·배치가 합리적으로 이루어져야 하는 것으로 많은 연구자들에 의해 논의되고 있다.

한편, 인공어초의 기능극대화를 위한 안정성에 관한 연구는 어초 구조물에 작용하는 유체력과 저질거동(침하)에 대한 것으로 대별된다. 작용유체력의 산정에 대한 연구로는 大西 等

(1983), 上北 等(1985), 松見(1991), 류 등(1994) 등의 연구결과가 있다. 또한 인공어초의 기능유지 및 극대화와 관련한 어초하부 저질거동에 관한 안정성 연구는 上藤 等(1980)의 현장조사에서 시작하여 榎木 等(1984), 류 등(1986) 등 여러 연구자들에 의하여 수리실험연구가 이루어져 왔다. 특히 榎木 等은 저질이 파 또는 흐름이 초기이동 한계조건 이하일 때에도 어초주변에 생기는 와류·축류에 의해 국소세굴이 발생함을 지적하고 있다. 또 Kimura et al.(1994)는 원통형 어초에 대한 세굴·퇴적 특성과 주요 영향인자를 논하였고, Kim et al.(1995)은 파랑장에서 어초 저면형상에 따른 세굴·퇴적특성을 연구하였으며, Ingsrisawang et al.(1995)은 인공어초의 침하특성을 실험 및 실험역 각각에서 검토하였다.

그러나, 인공어초 주위의 세굴·침하와 관련된 안정성에 대한 연구는 아직 미비한 실정으로, 최근까지 보고되어 오는 사례(제주대학교 해양연구소, 2000)에 비추어 볼 때 보다 합리적인 연구의 필요성이 제기되고 있다. 실제로 인공어초가 설치되는 해양 환경은 흐름과 파랑 두 요소가 공존하고 있으며, 흐름 자체도 조류에 의해 그 크기와 방향이 주기적으로 변하고 있다. 그러나, 인공어초의 세굴에 대한 안정성해석에 관한 기존 연구는 흐름장과 파랑장 각각의 환경에서 이루어졌고, 실험역에서의 침하연구(Ingsrisawang et al., 1995)를 제외하면, 조류와 같은 유속과 유향이 변화하는 비정상 흐름장과 흐름과 파랑이 공존하는 경우의 인공어초 주변 저질이동특성에 관한 연구결과는 미비한 실정이다.

이와 관련하여 김(2001)은 정상류 대신 조류와 같은 유속과 유향이 변하는 왕복성 비정상 흐름장을 고려한 수리모형 실험을 수행하여 인공어초 주변에 발생하는 세굴·퇴적 등의 저질이동

특성을 살펴보고 이러한 흐름과 저질 및 구조물(인공어초) 3자간의 상호작용 및 침하 특성을 규명한 바 있다.

본 연구에서는 앞서 수행된 연구와 실내수조를 이용한 수리모형 실험결과를 종합하여 정상 흐름장과 비정상 흐름장과의 차이를 분석하고 시간에 따른 침하특성(최대 침하량)을 고찰 하였다. 또한 현장 파랑조건을 고려하여 비정상 흐름-파랑 공존장에서 침하·세굴 특성을 수리실험으로 살펴보고, 그 특성을 정상 흐름장 및 비정상 흐름장에서의 결과와 비교·분석하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 차원해석 및 주요인자

주기성 비정상 흐름장 및 흐름-파랑 공존장에서 어초주변유동이 일으키는 세굴과 이에 따른 침하특성을 살펴보기 위한 주요 영향인자들을 조사하면 다음과 같다.

$$h_s = f(D, \rho_a, \epsilon_a, S_a, U, \rho_w, \mu, g, d_{50}, \rho_s, C_m, t, T, T_p, \theta) \quad (1)$$

여기서, D 와 ρ_a 는 어초의 대표길이 및 밀도이고 ϵ_a 는 어초의 공극률, S_a 는 어초형상, U 는 평균유속, ρ_w 와 μ 는 유체밀도 및 점성계수, g 는 중력가속도, d_{50} 과 ρ_s 는 저질의 중앙입경 및 밀도, C_m 는 균등계수, t 는 지속시간, T 는 파랑의 주기, T_p 는 비정상 흐름(조류)의 주기이며 θ 는 어초 설치방향(혹은 기울기)을 나타낸다. 그리고 상기 영향인자들을 D, U, μ 를 반복변수로 무차원화하여 얻어낸 무차원 세굴침하량 식은 다음과 같다.

$$\frac{h_s}{D} = f \left(\frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w - \rho_s}, \epsilon_a, S_a, \frac{UD}{\nu}, \frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{D}{d_{50}}, \frac{U^2}{(\rho/\rho_w - 1)gd_{50}}, C_m, \frac{UT}{D}, \frac{t}{T_p}, \frac{T}{T_p}, \theta \right) \quad (2)$$

우변에서 1항은 어초자중과 저질밀도에 따른 자중침하와 관련한 항이며, 2항은 어초의 공극률, 3항은 어초의 형상, 4항은 Reynolds 수(Re), 5항은 구조물에 대한 Froude 수, 6항은 사질 입경에 대한 구조물 대표길이비, 7항은 Shields 수(Sn)로서 저질의 이동한계와 관련한 것이며, 8항은 저질의 균등계수, 9항은 KC 수, 10항과 11항은 지속시간이다. 여기서 T_p 는 D/U 로서 평균류의 어초통과시간을 나타내며, 12항은 어초의 기울기를 나타내는 항이다.

2.2 실험조건 및 실험방법

수리실험은 파랑과 함께 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 2차원 조파수조에서 수행되었다. 흐름은 유속의 증가와 함께 방향 전환까지 고려한 정현파형의 유속 변화율을 적용하였고, 실험장에서의 조류 및 파랑 데이터를 참고로 상사법칙에 적용하여 실험을 수행하였다. 조파사의 수위 변동은 용량식 파고계(CH-305, Kenek Co.)로 측정하였고, 유속측정에는 도플러식 유속계(ADV, Nortek Co.) 2대를 사용하였으며, 세굴 및 침하의 측정은 어초에 부착한 스케일과 레벨로 정밀하게 측정하였다. 본 실험에 사용된 2차원 수조 및 설치된 이상의 장치들은 Fig. 1과 같다.

한편 수리모형 축척실험에서 사용된 저질의 입경에 대한 세의

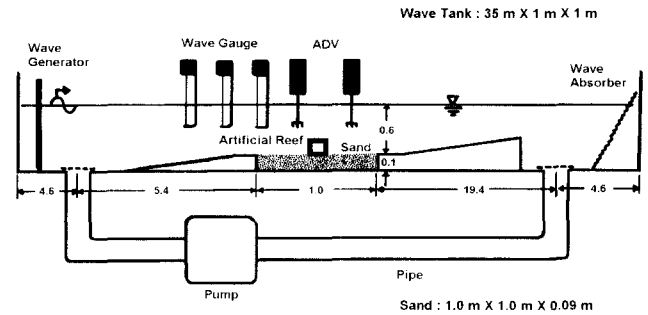


Fig. 1 Layout of wave flume and arrangement of experimental apparatus

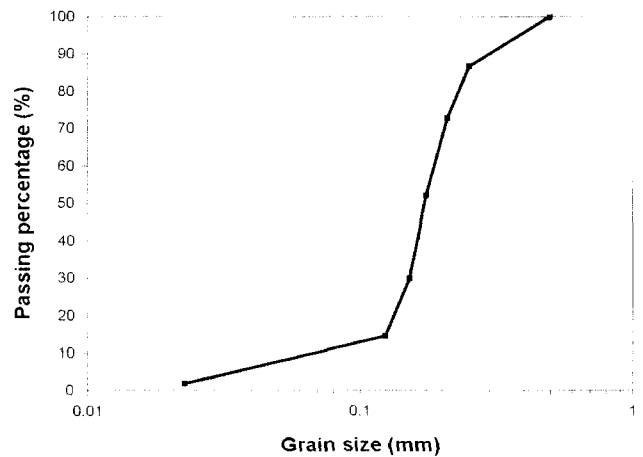


Fig. 2 Accumulation curve for grain size

Table 1 Experimental conditions

Structure	Sediment			Wave		Current
	d_{50} (mm)	σ_s	ρ_s (g/cm ³)	H (cm)	T (sec)	U_{max} (cm/sec)
Tetragon 6×6×6	0.18	1.48	2.062	4~12	0.8~1.6	12~20

통과율이 Fig. 2와 같으며 얻어진 저질의 중앙입경은 0.18 mm, 입경분포 $\sigma_s (= \sqrt{d_{84}/d_{16}}) = 1.48$ 이다. 세굴·침하실험을 위한 저질은 10 cm 정도로 넣고 수심은 60 cm가 되도록 하여 실험을 하였고, 어초 형상의 크기 및 작용 유속에 관한 실험조건은 실제 인공어초가 기설치된 해역 및 설치 예정지에서의 자료를 검토하여 Table 1과 같이 설정하였다.

흐름은 최대유속이 12, 14, 16, 18, 20 cm/sec 정도가 되도록 조절하였으며, 파랑은 파고가 4~12 cm, 주기 0.8~1.6 sec의 제원을 이용하였다. 최대유속의 지속시간은 20분이며, 유속의 크기는 조류와 같은 정현파형의 흐름변화를 재현하기 위해 최대유속 지속구간 전후의 20분 동안 서서히 증감시켰으며, 매 5분마다 세굴 관측 및 침하량과 유속 측정을 하였다.

3. 실험결과 및 해석

3.1 정상 흐름장

정상흐름 상태의 실험에서는 어초 하부를 지지하는 저질상태가 세굴로 인해 불안정해지지만, 지지상태는 어느 정도 일정하게 유지하고 있어서 어초의 급격한 기울기의 변화는 생기지 않고 매우 천천히 세굴·침하되는 특성이 나타났다. 이 결과는 기존의 연구결과(류청로 등, 1997)와 일치하는 것으로서 본 고에서는 생략하기로 한다.

3.2 주기성 비정상 흐름장

비정상 흐름장에서 인공어초의 세굴·침하 특성을 분석할 때, 최대지속 유속의 크기와 관계없이 Fig. 3과 같은 과정으로 세굴 및 어초의 기울임 현상이 발생하고, 이러한 어초의 기울임 현상은 추가적인 세굴로 이어져 어초의 침하가 발생하게 된다. 침하 곡선은 주어진 흐름장에서 정현파형의 형태로 증감하는 유속의 패턴과 유사하게 침하와 상승이 반복되는 양상을 보이고 있다.

조류를 고려한 비정상 흐름장에서 흐름-지반-구조물간의 상호작용 및 역학적 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 흐름이 순방향일 때;

유속 강도에 따라 어초 하부에 접하는 부분의 저질이동(세굴)으로 인한 비대칭 지반상에서 어초의 기울임 현상이 나타난다. 초기의 세굴이 한계값 이상이 되면 어초는 크게 기울고 그에 따른 지속적 세굴이 진행된다.

2) 흐름이 순방향에서 역방향으로 변할 때;

순방향 유속이 느려지는 상태에서도 어초 자중과 어초 지지점의 불일치에 따른 편향된 무게중심은, 자중으로도 어초가 계속해서 크게 기울어지게 되며, 이 현상은 역방향 유속이 한계값 이상이 되어 세굴지반의 위치가 전면부로 다시 이동하게 되며

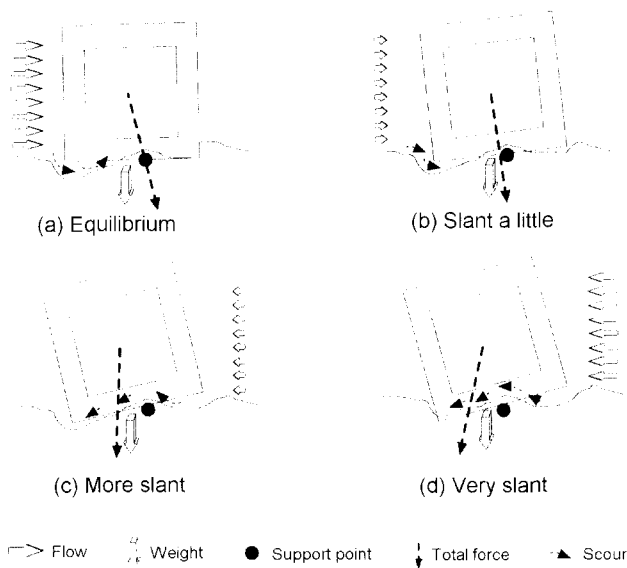


Fig. 3 Sediment movement and AFR behavior by flow change in the unsteady flow field

무게중심이 뒤로 쏠릴 때까지 계속된다.

3) 흐름이 역방향일 때;

어초는 불평형 지반 위에서 기울어진 채로 계속해서 천천히 침하되고 있으며 동시에 크게 기울어진 어초의 후면부는 가로부재 아래에 퇴적되던 부분이 세굴되면서 점차 전면부로 이동, 이전의 세굴영역에 들어가 매몰이 진행된다.

4) 흐름이 역방향에서 순방향으로 변할 때;

어초는 역방향 흐름이 완전히 없어지는 순간까지 계속해서 완만한 침하가 일어나게 되며, 다시 순방향의 흐름이 점차 강해지면서 전면의 매몰부위가 다시 세굴이 일어나게 된다. 이와 함께 어초 전면부는 약간 들리고, 어느 정도 기울기를 회복하는 양상을 보이면서 중앙 세굴·퇴적지반은 다시 어초 뒷부분으로 이동하기 시작해서 1)의 과정으로 되풀이된다.

Fig. 4는 이렇게 흐름의 강도 혹은 방향이 세굴에 영향을 미치는 것과 세굴이 구조물의 기울임과 같은 주기적 거동을 조래하는 것, 그리고 이러한 거동은 다시 세굴에 영향을 주는 흐름을 발생시키는 것을 나타내는 모식도이다.

조류를 고려한 비정상 흐름장의 세굴·침하 현상은 유속의 크기에 따라 최대 침하폭이 약간씩 다르게 나타나며, 특히 강한 유속상태에서 초기 침하폭이 크고 시간이 갈수록 점차 안정되어 가는 감쇠진동 파형의 침하폭 특성을 나타내었다. 그리고 유향이 변하는 시간대에서 크게 침하하거나 상승하고 있으므로, 조류를 고려한 비정상 흐름, 즉 흐름의 변화가 미치는 영향이 매우 크다는 것을 확인하였다.

한편, 흐름장의 최대지속유속으로 산출한 Reynolds 수를 통해 인공어초의 침하량과 침하폭 특성을 살펴보면, 전반적으로 Re^* 수가 8000 부근에서 침하가 일어나는 것으로 판단되며 Re^* 수가 9500 이상이 되는 영역에서는 최초 1주기간의 침하량 자체가 현저히 증가된 것을 확인할 수 있다. 또, 비정상 흐름장의 침하특성을 저질의 상태를 고려한 Shields 수에 대해서도 살펴보면 Reynolds 수에 대해 나타낸 결과와 거의 유사한 패턴을 보인다 (김, 2001).

Fig. 5는 비정상 흐름장의 시간에 따른 최대 침하량 특성을 정상 흐름장의 자료와 비교하여 나타낸 것이다. 정상 흐름장과 비정상 흐름장의 실험에서, 최대 지속유속(U_{max})이 14 cm/sec 미만인 경우에 어초는 세굴 침하에 대해 매우 안정적인 것으로 나타났다. 그림으로부터 최대 지속유속이 18 cm/sec 이상의 경우에는 시간의 경과에 따라 침하량이 증가되고 있으며 정상 흐름장과 비정상 흐름장간의 침하량 차이는 비정상 흐름이 한 주기를

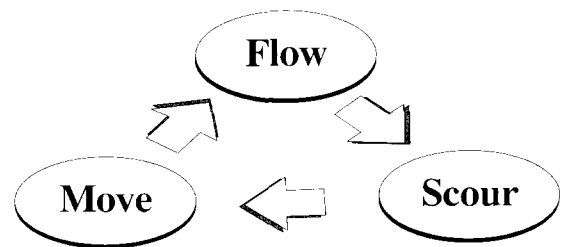


Fig. 4 The interaction of flow-sediment movement-structure behavior

넘어지면서 확인하게 나타난다. 실험 결과에 의하면 비정상 흐름장의 흐름속도가 2주기가 되는 부분에서 약 2배 가량의 차이가 발생하길 것으로 판단된다. 그리고 이것은 정상 흐름장에서는 상대적으로 빨리 침전적 침하상태로 전환되지만, 비정상 흐름장에서는 주기를 거듭하면서, 지속적인 재공과 침하가 나타나기 때문으로 판단된다.

한편, 이상의 실험 결과로부터 비정상 흐름장의 침하곡선은 시간경과에 따라 경사가 완만해짐을 알 수 있다. 따라서 비정상 흐름장에서도 정상흐름장의 경우와 같이 최대 침하량이 존재할 것으로 판단되므로, 비정상 흐름장에서 전형적인 침하 양상을 보여주는 최대 유속 18 cm/sec에서 최대 침하량을 규명하기 위한 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 최대 유속이 18 cm/sec인 비정상 흐름장에서, 흐름속이 8주기(16시간)의 흐름을 발생시킨 장기 침하실험의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 점(●)으로 나타낸 값들은 이층 전후방 침하량의 평균값을 나타내고 있으며, 실선은 이들 값들을 최소 차승법으로 구한 회귀곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이, 비정상 흐름장에서도 정상흐름장과 같이 시간경과에 따라 침하량의 최대 침하량에 수렴하고 있음을 명확하게 알 수 있다. 또한, 같은 유속조건에서 정상흐름장에서는 조류주기로 부차원한 시간(t/T_1)이 약 1.0 이후에서는 침하가 증가되지 않는다. 반면, 비정상 흐름장에서는 6.0~7.0의 조류주기 시간까지 침하가 지속적으로 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 비정상 흐름장의 유속의 크기에 따라 좌우될 수 있음을 쉽게 추측할 수 있으나, 본 실험결과만으로는 명확히 규명할 수 없으며 후후 보완실험을 통하여 검토하고자 한다.

한편, 실험결과로부터 구해진 시간경과에 따른 침하량의 회귀식은 식 (3)과 같으며, 각 시간대별 침하량의 최대 침하량에 대한 근접비를 Table 2에 나타내었다.

$$\frac{h_s}{D} = -0.17[1 - \exp^{-0.0304 t/T_1}] \quad (3)$$

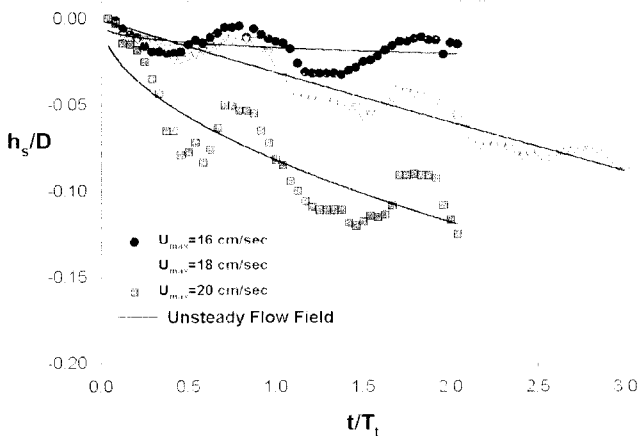


Fig. 5 Measurement and prediction of AFR subsidence according to the dimensionless time

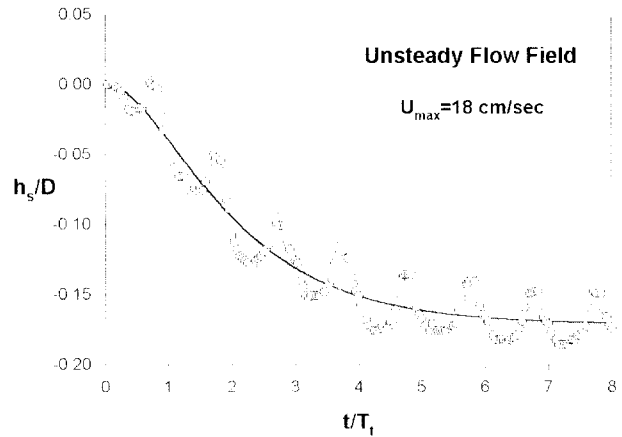


Fig. 6 Measurement and prediction of AFR subsidence according to the dimensionless time (in longtime subsidence experiment)

Table 2 Measured and predicted AFR dimensionless subsidence

t/T_1	4	5	8	...
h_s/D	-0.15	-0.16	-0.17	-0.17
$h_s/h_{max}(\%)$	88.0	94.0	99.3	-

Table 3 The calculated maximum particle velocity

Wave condition		Maximum particle velocity	
T (sec)	H (cm)	U_{max} (cm/sec)	U_{max} (cm/sec)
1.2	9.88	+7.8134	-9.2893
1.6	7.45	+9.4848	-10.3917
1.4	10.38	+10.8974	-12.5485

$$\ast U_{max} = U_{max} + U_{max}$$

3.3 주기성 비정상 흐름-파랑 공존장

흐름-파랑 공존장에서의 흐름 특성을 살펴보기 위해서는 파랑장에서의 물입자속도 산정이 선행되어야 한다. 이때의 물입자속도는 파랑의 이론적 물입자 속도 산정법으로 구해진 값을 표준으로 하였고, 유속계로 측정된 값으로 확인하였다. 한편 이론적 물입자 속도는 수심에 따른 파랑의 비선형성, 불규칙파에 대한 적용성 등을 고려하여 다음과 같은 Koyama & Iwata(1985)의 수정된 물입자 속도 산정법을 이용하였다.

$$U(t) = \frac{2\pi}{T} \frac{\cosh k}{\sinh k[h + \eta(1 - s/(h - \eta))]} \eta(t) \quad ; \eta > 0 \quad (4)$$

$$U(t) = \frac{2\pi}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kh} \eta(t) \quad ; \eta \leq 0 \quad (5)$$

여기서, k 는 파수, h 는 수심, $\eta(t)$ 는 평균수면으로부터의 수위이며 s 는 유속을 얻고자 하는 지면으로부터의 z 방향 거리를 나타

낸다. 40 msec의 시간간격으로 각 파랑제원에 대한 파형과 상기 산정식으로 얻어진 대표 최대유속값을 Table 3에 나타내었다.

이상과 같은 방법으로 구해진 파랑장의 물입자 속도(U_{max})는 흐름장에서의 유속(U_{mean})과 산술적 합으로 흐름-파랑 공존장의 유속을 구할 수 있으며, 얻어진 대표 물입자 속도는 실측 유속 값과 거의 일치하고 있음을 확인하였다.

Fig. 7~9는 비정상 흐름-파랑 공존장에서의 시간경과에 따른 침하를 나타낸 그림이다. 이들 그림은 모두 최대 유속이 12 cm/sec인 비정상 흐름장에 파랑을 중첩시킨 경우이며, 참고로 비정상 흐름장인 경우 세굴 및 퇴적은 반복적으로 미약하게 발생하지만 어초의 침하현상은 거의 발생하지 않았다. 이들 그림에서 알 수 있듯이, 흐름-파랑 공존장에서는 동일 최대유속의 비정상 흐름장 조건에서 발생하지 않았던 침하현상이 파랑에 의해 현저하게 발생하는 것을 알 수 있으며, 그 침하량은 주기, 파고를 약간씩 달리한 세 경우 모두 어초 높이의 5~10% 정도 침하됨을 알 수 있다. 이것은 파랑에 의한 유속의 증가 때문에 발생하는 것임을 명확히 알 수 있다. 그리고 더욱 다양한 해석조건에서는 침하가 현저히 일어나는 주기와 파고의 한계값이 존재할 것으로 판단되며, 이러한 검토를 위해 보다 세밀한 연구가 요망된다.

한편 파랑장에서 제반 물리량의 특성을 논할 때 보통 KC 수 (Keulegan-Carpenter number)를 사용한다. Fig. 10은 유속인자로 수평최대 수립자속도 U_{max} 를 사용한 KC 수로 침하량을 검토한 것이다. 그림에서 KC 수와 무차원 침하량간의 뚜렷한 성향을 찾을 수 없으며, 이는 상대적으로 파고의 크기가 작음에도 불구하고 주기가 큰 파랑인 경우(C) 높은 수치의 KC 수로 결정되어 졌기 때문인 것으로 판단된다.

한편 Fig. 11은 같은 유속 U_{max} 를 사용한 수정된 Reynolds 수 (Re^*)를 써서 나타내어 비정상 흐름장과 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 비정상 흐름-파랑 공존장에서 무차원 침하량을 평가하는데 있어서 Re^* 가 KC 수보다 유용한 것으로 판단된다. 이것은 파랑장에서의 U_{max} 에 파랑의 주기 및 파고가 고려되었으므로, 따라서 이 U_{max} 를 이용하여 나타낸 Re^* 는 KC 수가 가지고 있는 모든 인자들을 포함하면서도 실제 침하에 영향을 미치는 저층의 유속상태를 결정할 수 있는 무차원수라는 점에서 신뢰할 수 있다고 판단된다.

또한 그림으로부터 비정상 흐름장과 비정상 흐름-파랑 공존장 각각의 환경에서 나타나는 동일한 침하값에 대한 Sn^* 값 분포 영역이 다르며, 이것은 주어진 실험시간동안 세굴과 침하에 직접적으로 영향을 미치는 흐름의 작용시간의 차이에 의한 것으로 판단된다.

또한, 저질의 상태를 고려한 이동한계 경험식인 Sn^* 수를 이용하여 침하특성을 나타내고 정상 흐름장, 파랑장, 비정상 흐름장에서의 결과를 함께 비교한 것이 Fig. 12이다. 이때의 Sn^* 역시 Re^* 와 마찬가지로 유속인자로서 U_{max} 를 사용한 것이다. 그리고, 저질의 상태와 관련된 무차원 유속 Sn^* 로 정상 흐름장, 파랑장, 비정상 흐름장 및 비정상 흐름-파랑 공존장의 침하특성을 비교해 보면, 앞서 Re^* 로 비교해 본 바와 같이 각각의 조건에서 동일한 침하값에 대한 Sn^* 값 분포영역이 다르게 나타남을 알 수 있다.

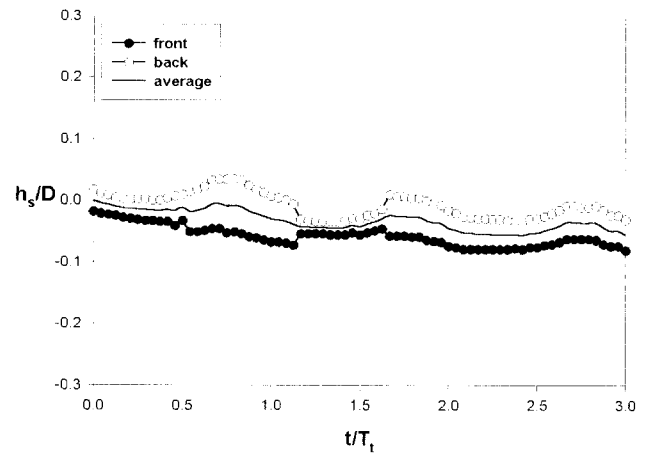


Fig. 7 Subsidence process of AFR in the unsteady flow-wave field ($U_{max}=12$ cm/sec, $T=1.2$ sec, $H=9.8$ cm)

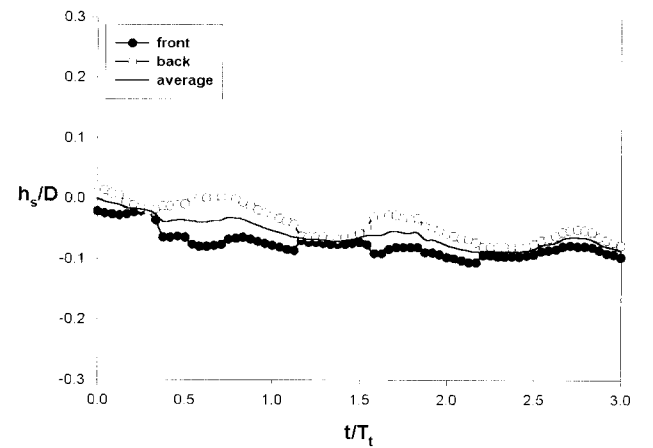


Fig. 8 Subsidence process of AFR in the unsteady flow-wave field ($U_{max}=12$ cm/sec, $T=1.4$ sec, $H=10.38$ cm)

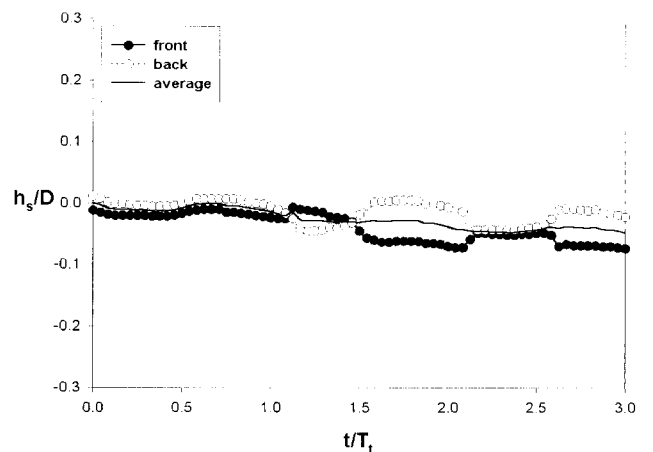


Fig. 9 Subsidence process of AFR in the unsteady flow-wave field ($U_{max}=12$ cm/sec, $T=1.6$ sec, $H=7.45$ cm)

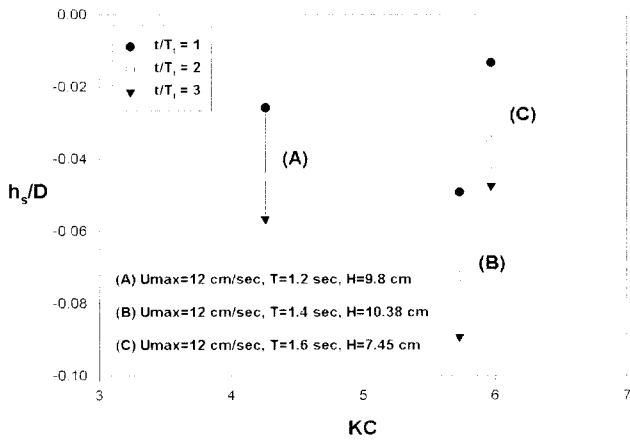


Fig. 10 Dimensionless subsidence of AFR according to KC

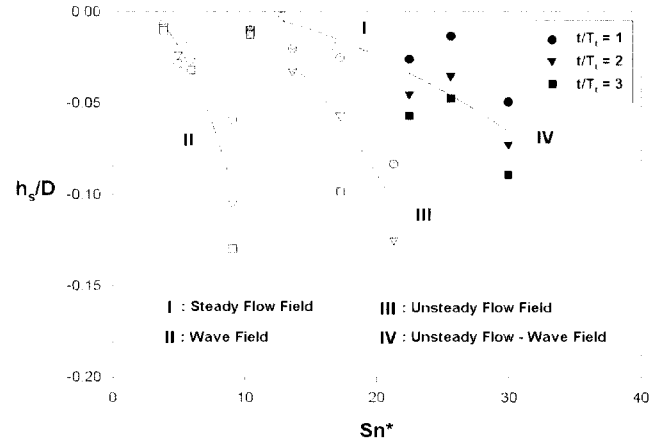


Fig. 12 Maximum subsidence of AFR according to modified Shields number (Sn^*)

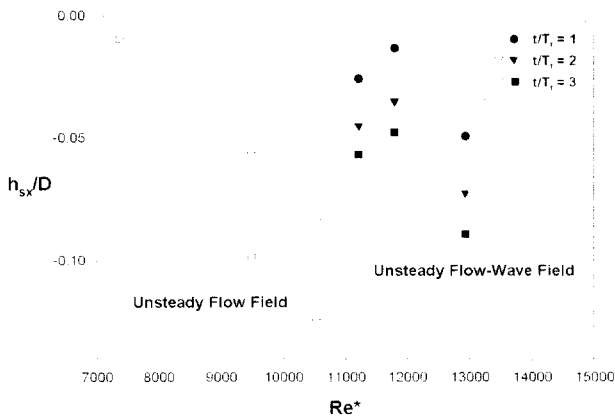


Fig. 11 AFR subsidence according to Re^*

Table 4 The dimensionless subsidence comparative

U_{max} , U_{max} (cm/sec)	Unsteady Flow	Unsteady Flow-Wave		
		(A)	(B)	(C)
20.00		21.29	22.39	24.55
h_s/D (Rate)	$t/T_i=1$	-0.08 (38)	-0.03 (63)	-0.01 (13)
	$t/T_i=2$	-0.13 (38)	-0.05 (62)	-0.04 (31)

Fig. 13은 조류를 고려한 비정상 흐름과 파랑과의 공존상에서 조류 1주기로 부차원화한 시간 경과에 따른 어초의 평균 침하량을 나타낸 결과이다. 또한, 비정상 흐름장만일 때 침하가 거의 발생하지 않았던 최대유속 12 cm/sec인 경우와 비교하여 비정상 흐름-파랑 공존상일 경우의 시간경과에 따른 침하특성을 나타낸 것이다. 주기 1.4 sec, 파고 10.38 cm인 파랑 조건에서 활발한 침하를 보이는 것을 비롯해서, 흐름과 파랑의 상호작용으로 확연하게 침하가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 비정상 흐름-파랑 공존상 조건에서 부차원 침하량을 살펴보면, 전체적으로 흐름주기 1주기에 0.01~0.05, 2주기에 0.04~0.08, 그리고 3주기에 0.05~0.08 정도가 되는 것으로 나타났다.

그리고 상기 비정상 흐름-파랑 공존상의 침하실험 (A), (B), (C) 각각의 대표 최대유속값 U_{max} 와 비슷한 크기의 비정상 흐름장의 최대유속 U_{max} 에 대하여 각각에서의 침하량을 비교하여 Table 4에 나타냈으며, 상대침하비율(Rate)은 동일 부차원주기(시간)의 비정상 흐름장 침하값에 대한 비정상 흐름-파랑 공존상 침하값의 비(%)를 나타낸 것이다.

표에서 볼 수 있는 바와 같이, 비정상 흐름-파랑 공존상의 침하량은 비슷한 최대유속을 가지는 비정상 흐름장의 침하값에 비

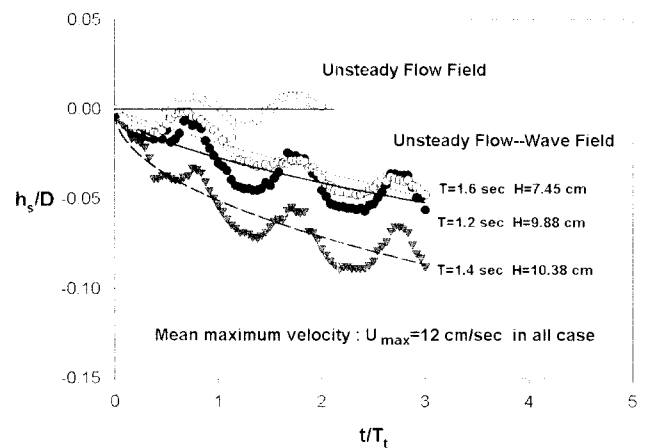


Fig. 13 Measurement and prediction of AFR subsidence according to the dimensionless time

해 38%(A), 62%(B) 정도의 상대적으로 작은 침하가 발생하였으며, 이와같이 시간적으로 완만한 침하는 앞서 설명했듯이 물입자가 지점의 이동에 직접 영향을 미치는 지속시간의 차이에 의

한 것으로 판단된다. 그리고 (C)의 경우는 주기가 1.6 sec로 가장 긴 파랑의 경우임에도 불구하고 각 흐름주기에서 13%와 31%의 매우 작은 상대침하비율(Rate^{*})을 나타내고 있으며, 이는 상대적으로 작은 파고의 영향이 작용한 것으로 판단된다. 참고로, 파랑제원(주기, 파고)의 차이에 따른 공존장에서의 어초 침하특성은 실험결과를 보충하여 추후 보고할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 인공어초의 침하 및 매몰 특성을 명확히 밝히기 위한 목적으로, 실험역과 같은 주기성 비정상 흐름장(조류)을 대상으로 정상흐름장과의 차이를 분석해 보았으며, 비정상 흐름-파랑 공존장의 인공어초 침하특성을 규명하고 비정상 흐름장과 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정상 흐름장에서의 침하량은 짧은 시간에 점진적 침하상태로 변하는 반면, 조류를 고려한 비정상 흐름장에서는 흐름이 주기를 거듭하면서 어초의 거동과 이에 따른 세굴현상에 기인한 추가적인 침하가 발생하며, 비정상 흐름이 1주기를 넘어서면서 침하량에 차이가 나기 시작해서 2주기가 되면 최소 2배 이상 차이가 나타난다.

(2) 비정상 흐름장에서 장기 침하실험을 수행한 결과, 정상 흐름장과 같이 최대 침하량값은 시간경과에 따라 일정값으로 수렴하였다. 전형적인 침하양상을 보이는 최대유속 18 cm/sec의 비정상 흐름장이 일정하게 유지되는 경우 최대 무차원 침하량은 0.17로 나타났으며, 정상 흐름장과는 달리 비정상 흐름장에서는 6.0~7.0의 조류주기까지 침하가 지속적으로 발생한다.

(3) 저질의 상태와 관련된 무차원 수 Sn^* 로 정상 흐름장, 파랑장, 비정상 흐름장 및 비정상 흐름-파랑 공존장의 침하특성을 비교해 본 결과, 각각의 환경에서 나타나는 동일한 침하값에 대한 Sn^* 값 분포영역이 다르며, 이것은 주어진 실험시간동안 세굴과 침하에 직접적으로 영향을 미치는 흐름의 작용시간 차이에 의한 것으로 판단된다. 그리고 비정상 흐름-파랑 공존장에서 침하특성을 고려할 경우, KC 수 혹은 Re^* 수보다 Sn^* 가 더욱 합리적인 파라메타인 것으로 판단된다.

(4) 비정상 흐름-파랑 공존장의 대표 최대유속값 U_{max}^* 와 비슷한 크기의 비정상 흐름장 최대유속값 U_{max} 에 대해 각각에서의 침하량을 비교해 본 결과, 비정상 흐름-파랑 공존장의 침하는 비정상 흐름장에서의 침하값에 비해 38%(A), 62%(B) 정도의 상대적으로 작은 침하가 발생하였으며, 이러한 현상 역시 물입자가 저질의 이동에 직접 영향을 미치는 지속시간의 차이에 의한 것으로 해석된다. 또한 상대적으로 주기가 긴 파랑의 경우에도 상대적으로 작은 파고값에 대해서는 상대침하비율(Rate^{*})이 작게 나타났다. 따라서 주기 및 파고 각각의 차이에 따른 침하특성을 규명하기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 국립수산진흥원(1992). "사업보고 제95호 한국연안 인공어초의 자원조성효과에 관한 연구", pp 89.
- 김현태(2001). "비정상 흐름장의 인공어초 침하특성에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 15(2), pp 33~38.
- 柳靑魯, 柳演善, 林琦璿(1986). "人工魚礁의 規模와 配置에 관한 研究", 수진연구보고, 38, pp 1~24.
- 류청로, 김현주(1994). "착저식 인공어초에 작용하는 파력특성에 관한 연구", 한수지, 27(5), pp 605~612.
- 류청로, 김현주, 이한수, 신동일(1997). "생태계 제어 시설물의 설계 및 배치 최적화(2) -흐름장에서의 인공어초 침하 및 매몰 특성-", 한수지, 30(1), pp 139~147.
- 윤상준, 김현태(2001). "비정상 흐름장의 인공어초 침하특성에 관한 실험적 연구", 2001년도 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 234~239.
- 제주대학교 해양연구소(2000). 인공어초 시설어장 사후관리 및 효과조사 보고서, pp 78.
- 해양수산부(2000). "인공어초 시설실적", pp 143.
- Ingrisawang, V., M. Ban, H. Kimura(1995). "Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments", Fisheries Engineering, 32(2), pp 95~103.
- Kim J.Q, N. Mizutani and K. Iwata.(1995). "Experimental study on the local scour and embedment of fish reef by wave action in shallow water depth", Proc. of ECOSSET'95, pp 168~173.
- Kimura, H., V. Ingrisawang, M. Ban(1994). "A study on local scour of cylinder artificial fish reefs", Fisheries Engineering, 31(1), pp 33~40.
- Koyama H. and K. Iwata(1985). "Estimation of water particle velocities by a modified transfer function method", Coastal Engineering in Japan, 28, pp 1~13.
- 日藤基壽 等(1980). "日向灘中部沿岸の人工魚礁水調査結果", 水産土木, 17(2), pp 9~15.
- 大西外明, 松本要一(1983). "魚礁ブラクの抗力係數實驗的檢討", 水産土木, 20(1), pp 7~14.
- 上北征男, 明田定滿(1985). "角形魚礁に作用する流體力の特性について", 第32回海峯工學講演會論文集, pp 643~646.
- 松見吉晴(1991). "着底式魚礁に作用する流體力に關する研究", 海峯工學論文集, 38, pp 801~805.
- 根本亨(1984). "魚礁周辺の局所洗掘とその對策工法について", 第31回海峯工學講演會論文集, 30, pp 345~349.

2001년 5월 25일 원고 접수

2001년 8월 3일 수정본 채택