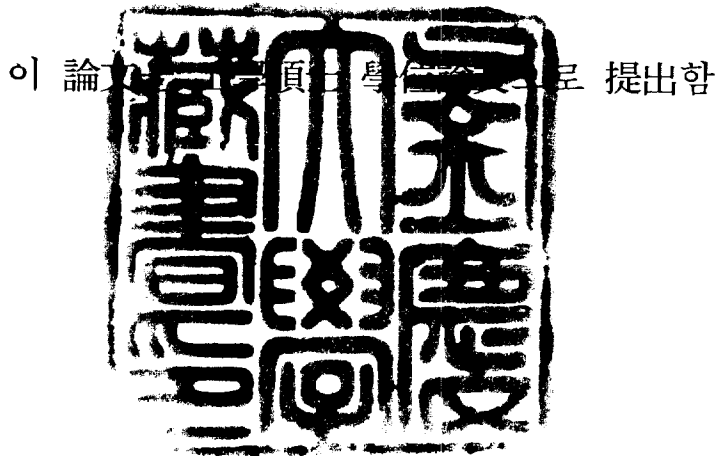


工學碩士 學位論文

軟弱海底地盤上の 人工魚礁
沈下・埋沒特性에 관한 研究

指導教授 柳 青 魯



2002年 2月

釜慶大學校 大學院

海 洋 工 學 科

河 賢 喆

河賢喆의 工學碩士 學位論文을 認准함

2001年 12月 26日

主 審 工學博士 金 憲 泰



委 員 工學博士 尹 吉 秀



委 員 工學博士 柳 青 魯



目 次

List of Figures	ii
List of Tables	iv
List of Symbols	v
ABSTRACT	vii
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구사	3
1.3 연구목적	5
2. 인공어초와 연약해저지반	7
2.1 인공어초의 시설수심 및 시설위치	7
2.2 연약해저지반의 공학적 특성	10
2.3 연약해저지반상의 인공어초 침하량 산정	21
3. 인공어초 침하실험	26
3.1 영향인자에 대한 해석	26
3.2 실험조건과 방법	30
4. 실험역 인공어초의 침하·매물특성	34
5. 정하중조건에서 인공어초의 침하·매물특성	38
5.1 구조물의 형상변화에 따른 침하·매물	39
5.2 구조물의 하중에 따른 침하·매물	42
6. 동하중조건에서 인공어초의 침하·매물특성	46
6.1 파랑장에서의 침하·매물	49
6.2 파랑장 및 공존장에서의 침하·매물특성 비교	54
7. 결론	59
참고문헌	61

List of Figures

- Fig. 1. Flow chart of study about artificial reef subsidence.
- Fig. 2. Flow chart of this study.
- Fig. 3. Map of artificial reef's arrangement(Kim, 2000). Blue letter shows installed quantity of artificial reef.
- Fig. 4. Distribution of mixed sediments(Folk, 1954).
- Fig. 5. Distribution of sediment types(Dashed lines: 200m depth)
A: West Sea, B: South Sea, C: Southeast Sea, D : East Sea(Choi, 1993).
- Fig. 6. Static thin plate subsidence instrument(Lee, 1994).
- Fig. 7. Modified static thin plate subsidence instrument in the experiment.
- Fig. 8. Conditions for dimension analysis.
- Fig. 9. Model of artificial reef used in the experiment.
(1-3:Pillar type, 4-6:Pipe type, 7:reef($4.5 \times 4.5 \times 4.5$ cm)).
- Fig. 10. Instance subsidence measuring apparatus.
- Fig. 11. Arrangement of experimental apparatus.
- Fig. 12. Location of surveying the state of Dice reef of subsidence
(❶ and ❷ in the map gives the site installed by a reef and piled up by some reefs).
- Fig. 13. Initial subsidence measuring apparatus.
- Fig. 14. Stabilization characteristics according to self-weight consolidation of the sediment used in the experiment.
- Fig. 15. Subsidence determination instrument.
- Fig. 16. Subsidence of form(triangle, square, circle) for static condition.
- Fig. 17. Subsidence of form(triangle, square, circle) for static condition
(A:Pillar type, B:Pipe type).
- Fig. 18. Initial subsidence of model dice reef according to shear strength by different grain size in the experiment.
- Fig. 19. Subsidence of dice reef in the static weight experiment
($l=7$ cm).
- Fig. 20. Subsidence of dice reef used in the static experiment

according to weight($l=0.7\text{cm}$).

Fig. 21. Process of subsidence.

Fig. 22. Subsidence of form(triangle, square, circle) for dynamic condition.

Fig. 23. Dynamic subsidence according to K.C number.

Fig. 24. Subsidence velocity according to relative wave height.

Fig. 25. Maximum subsidence of artificial reef according to shear strength.

Fig. 26. Subsidence velocity according to K.C number.

Fig. 27. Subsidence according to time elapse in wave field.

Fig. 28. Subsidence according to time elapse in wave and flow field.

Fig. 29. Maximum subsidence of artificial reef according to K.C number.

Fig. 30. Subsidence velocity according to relative wave height.

List of Tables

- Table 1 Vital point of compatible region survey of artificial reef institution(NFRDI, 2001)
- Table 2 Soft bed distinction about clay
- Table 3 Marine clay of Korea(Tojigaebalgongsa, 1993)
- Table 4 Size of thin plate
- Table 5 Hydraulic model experimental condition
- Table 6 The principal factor of wave-maker system
- Table 7 The depth of maximum subsidence of dice reefs installed at Jangseungpo area provinced in Korea. Reef were installed in 1999. A unit means a reef
- Table 8 Insitu observations about immediate subsidence at Ulsan waters

List of Figures

k	Wave number
T	Wave period
L	Wave length
H	Wave height
U_m	Bottom maximum velocity
d	Water depth
μ	Viscosity
ρ_w	Density of water
ρ_a	Density of model artificial reef
W	Weight of Artificial Reef
d_{50}	Medium grain size
D	Length of artificial reef
i	Bottom
h_s	Subdience depth
g	Gravity
e	Porosity
q_w	Weight per unit area in the water
w	Water ratio
C_c	Compression index
E	Young index
W_t	Weight of thin plate
l	Depth of seabed
μ_s	Possion ratio
t	Time
d_{inst}	Immediate subsidence of artificial reef
d_s	Subsidence depth of artificial reef or sediment according to time
d_e	maximum subsidence depth of structure

d_d	Dynamic subsidence of artificial reef
KC	Keulegan-Carpenter number
ν	Coefficient of kinematic
U_{sv}	Subsidence velocity
τ	Shear strength of seabed
γ_{sub}	density of seabed in the water

A Study on the Subsidence/Burial Characteristics of Artificial Reef Constructed on Soft Seabed Conditions

Hyun-Chul Ha

*Department of Ocean Engineering, Graduate School.
Pukyong National University*

Abstract

In this paper, we found the subsidence/burial characteristics of artificial reef on the soft seabed conditions such as marine clay.

First, we studied the static subsidence of artificial reef on the soft bed under the model experiment. And, the shape characteristics on the subsidence were discussed.

Second, the dynamic characteristics of artificial reef on the subsidence were discussed considering wave and flow.

The results of this study obtained were summarized as:

- 1) Initial subsidence of artificial reef on soft seabed was in inverse proportional to shear strength of seabed.
- 2) Dynamic subsidence of artificial reef on soft seabed was proportional to K.C number.
- 3) Dynamic subsidence of artificial reef on soft seabed occurred under the condition of K.C number is 1.
- 4) No dynamic subsidence occurred in steady flow field.
- 5) The most effective parameter on the subsidence of artificial reef on soft seabed was not flow but wave.

1. 서론

1.1 연구배경

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸인 반도로서 해안선의 길이가 길고, 대륙붕이 넓어 수산업 발달에 매우 좋은 입지조건을 갖추고 있다. 이와 같이 우리나라는 지리학적으로 바다의 중요성이 크므로 육지에서 나는 식량자원의 한계를 무한한 수산자원이 자라나는 바다에서 해결해야 할 필요성이 크다. 또한 우리나라 주변 각국의 200해리 배타적 경제수역 선포에 따른 수산의 자국화 정책 강화로 ‘잡는 어업’에서 ‘기르는 어업’으로의 자원조성의 중요성이 한층 강하게 인식되고 있다. 또한 연안어장의 오염과 황폐화로 현재의 어장은 그 기능을 상실해 물고기가 찾아오지 않는 이름뿐인 어장이 되고 있다. 따라서 바다의 그린벨트를 형성해주고 자원개발의 대표적 방법으로 주목받고 있는 인공어초의 조성은 우리나라의 실정에서 굉장히 중요한 사안이다. 인공어초 사업은 1971년부터 어려운 어업환경을 개선하고, 불법 트롤어업으로부터 자원을 보호하고, 수산자원을 육성하기 위한 취지로 실시되고 있다. 또한 이것은 우리나라 수산투자사업 중 어항건설사업 다음으로 가장 많은 예산이 투입되는 정책사업이다. 어업자원의 보전 방안으로서 많은 노력들이 이루어졌지만 실제적으로 눈에 띄는 효과를 거두지 못하여 보다 적극적인 자원조성 방법으로서 인공어초 시설사업이 실시된 것이다.

1971년부터 2000년까지 30년간 총 4,701억원이란 막대한 자금이 어초사업에 투입되고 있다. 최근 10 여년 전까지는 연안 20m 이내의 바가지 모양의 반구형어초를 설치하였으며, 연안 30m 이상 되는 곳에는 크기 2m의 사각어초를 설치하였으나 요즘은 육교형어초, 연약지반어초등 다양한 형태로서 설치되고 있다. 설치 형태에서도 초창기에는 대상 지역에 마구 투척(자유투하)하는 방식을 취하였지만 이런 경우 어초의 손실이 심해 그 역할을 하지 못하므로 요즘에는 마치 블록을 쌓듯이 더미를 만들어 놓고 있다. 최근에는 막대한 비용 투입에 대한 효과를 증대시키기 위해 어류만을 대상으로 하지 않고 지역적 특성과 대상생물의 생태를 이용하여, 전복용 어초, 해조류용 어초 등 다양한 모양과 기능을 가진 인공어초가 만들어져서 시설되

고 있다. 인공어초는 파랑, 조류등 다양한 외력의 영향으로 기능성 및 안정성이 저하될 우려가 큰 환경에 설치되므로 이에 대한 배경이 될 연구가 밑받침이 되어야 한다. 우리나라에서는 여러 수산증식 시설중 착저식 어초를 중심으로 시설해왔으므로 착저지반과의 관련성을 실재해역에 적용할 수 있도록 고려함이 필요하나 현재까지의 연구는 대상지반을 안정성이 큰 사질지반만을 고려하여 위험성이 큰 점성토지반에 대한 부분은 간과해온 것이 사실이다. 이와 같이 인공어초와 착저지반과의 상호관련성에 관한 공학적인 연구는 미비한 실정이며 실제 현장의 조건을 고려하였을 때, 저질이 사질토가 아닌 점성토인 경우에 대한 연구는 전무하다고해도 과언이 아니다. 사질토와 점성토는 그 공학적인 성질에 엄청난 차이가 있어 착저지반으로서 동일한 방법으로 고려하거나 그 입도조성만을 생각하여서는 안되는 것이다. 이러한 연약한 점성토지반의 해역 또한 중요한 어장이 이루어지며 어로가 되지만 이러한 곳에 인공어초를 설치할 경우에는 지지력이 좋고 흙의 강도가 큰 사질지반에 비교하여 보다 큰 침하가 발생하여 결국 매몰되는 결과를 초래한다. 특히 우리나라의 연근해 저질은 그 성분이 니질을 많이 함유하고 있는 해성점토가 많이 분포하므로 이에 대한 연구가 시급하다고 할 것이다. 인공어초의 매몰은 수산생물들의 부착면을 감소시켜 어초의 생산성을 떨어뜨리게 하고 투영면적이 줄어 와류의 생성도 줄어들게 한다. 실제로 현장에서 이러한 인공어초의 매몰 사례가 빈번하다고 보고된 바 있으며(수진원, 2000) 인공어초로서의 기능성을 상실함으로써 연안어장의 조성파괴 및 수산자원의 생산성 저하등의 결과를 초래하고 있다. 또한 기존의 어초어장 해저지반의 동적 거동과 관련한 국부세굴, 침하, 매몰 등에 의한 기능저하 및 재해가 많이 있으나 그 실태는 정확히 파악되지 못하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라, 어초의 침하 및 매몰의 정량적 예측방법과 그 대책이 수립되어 있지 않은 상태이다. 결국 경제적으로 엄청난 손실일 뿐만 아니라 국가적 경쟁력 저하의 원인으로 작용하게 된다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해 니질의 함유량이 큰 해저지반에 설치하여도 침하에 저항할 수 있는 인공어초구조를 개발해야 할 필요성이 요구되고 있다.

인공어초의 안정성에 관한 기존의 연구는 대부분이 수리학적인 방면으로 이루어졌으며 해저지반과의 관련성을 상세히 고려하지 않고

어초를 제작 투하하여 왔기 때문에 인공어초가 안정적으로 그 기능을 다하는지에 관한 관심을 갖지 못하였다. 아직까지 인공어초와 해저지반의 동적 거동에 관한 토질과 수리를 함께 고려한 연구는 거의 찾아 볼 수 없으며, 세굴과 퇴적등의 저질이동, 액상화에 관한 내용에 그치는 실정이므로, 특히 연약한 해저지반을 고려한 인공어초 침하·매물특성에 대한 해명이 꼭 필요하다.

1.2 연구사

인공어초에 관한 현재까지의 연구 경향으로서는 인공어초의 시설 후 목적에 부합하여 그 기능을 다하고 있는가의 기능성과 효과성에 관한 연구, 시설방법 및 보존을 위한 것으로서 외력의 특성 및 안정성 연구로 나누어 생각할 수 있다. 인공어초의 효과에 관한 연구로서는 柿元(1984), 국립수산진흥원(2000)등의 연구가 있으며 인공어초 시설 후에 부착생물의 양과 어획량을 조사하였고 인공어초어장이 일반어장과 비교하여 평균 2~3배의 어획효과가 있으며, 여러 가지 인공어초 재료에 따라 해조류등의 다양한 부착생물들이 생성되어 있다고 보고하고 있다. 외력특성 및 안정성에 관한 연구는 첫째, 유체력의 특성 및 산정에 관한 것으로서 大畠 등(1983), 上北 등(1985), 松見(1991), Ryu(1994)의 연구가 있다. 이상의 연구는 유체장에서의 합리적인 외력의 산정 방법을 찾는 것으로 귀결되었다. 둘째, 인공어초의 기능성 및 지반거동의 안정성에 관한 연구는 주로 유체장에 있어 침하·세굴에 대한 연구로서 榎木 등(1984), Ryu(1986) 등은 K.C number의 중요성에 대해 논의하였고 久寶(1986, 1987)는 인공어초의 침하가 어초 주변에 작용하는 와류에 의해 발생한다고 하였으며 실험을 통한 침하량산정식을 제안하였다. 그리고 Kimura 등(1994)은 원통형어초에 대한 세굴·퇴적특성과 주요 영향인자에 대해 논의하였고 Kim 등(1995)은 파랑장에서 어초저면 형상에 따른 세굴·퇴적 특성에 대해 논의하였으며 Ingsrisawang 등(1995)은 인공어초의 침하에 대해 실내 실험 및 실험해역 실험을 통해 검토하였고 Ryu(1997)는 흐름장에서 인공어초의 세굴·퇴적특성과 침하·매물 방지대책에 대해 보고하였고 Lee(1998)는 지반의 지지력 부족에 의해 인공어초의 과대 침하가 발

생한다고 하였으며 Kim(2001)은 비정상 흐름장에서 인공어초의 침하특성에 대해서 수리실험을 통해 논의하였다. 셋째, 해저지반의 유체력에 의한 안정성에 관한 연구로서 Henkel(1970), Poulous(1988) 등의 것이 있는데 유체력이 지반에 주기적·비주기적으로 작용함으로써 구조물의 안정성에 심각한 영향을 줄 수 있음을 보고하였다.

위의 대부분의 실험은 인공어초의 착저지반에 대해서 사질토를 고려한 경우로서 실제로 다양한 저질 위에 시설되는 인공어초의 침하·매물특성을 고려하지 못하였다. 또한 연약한 해저지반 위에 인공어초를 시설해야할 필요성이 제기되는 시점이므로 그 침하특성을 반드시 논의하여야 할 것이다.

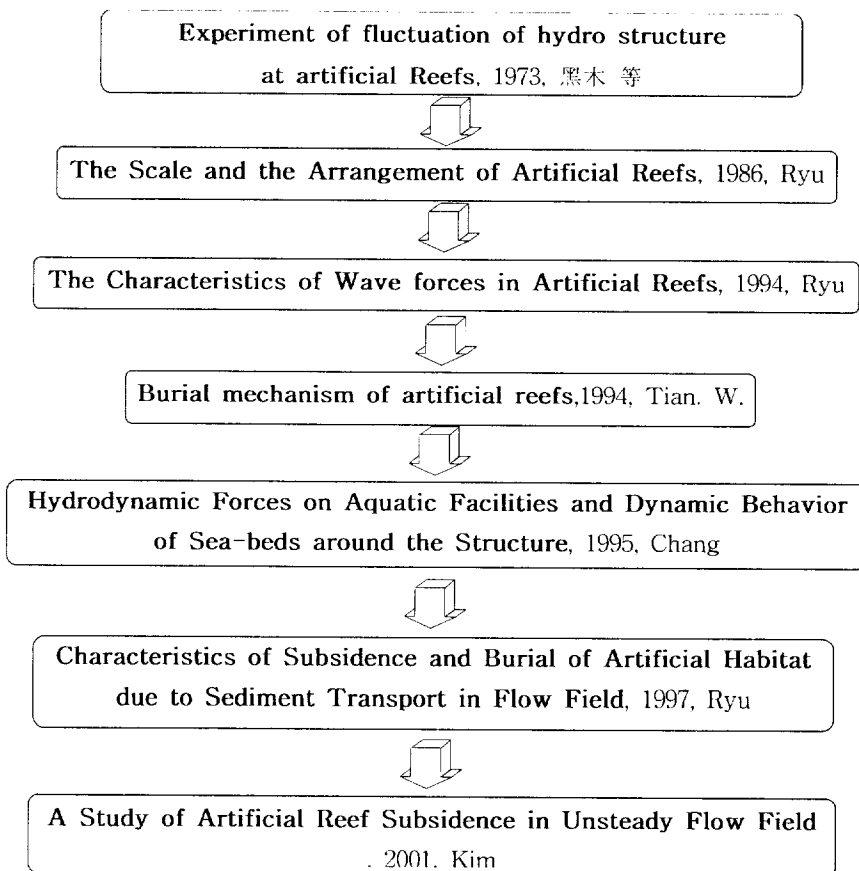


Fig. 1. Flow chart of study about artificial reef subsidence.

1.3 연구목적

현재 우리나라는 대·내외적인 여건과 실정에 따라 잡는 어업에서 기르는 어업으로 전환하고 있다. 이에 따라, 생태계 제어 시설물의 중요성이 커지고 있으나 이의 관리 및 보존은 체계적인 계획에 맞추어 이루어지지 못하고 있으며 밀반침이 되는 연구도 부족한 실정이다. 바다목장화의 주요 시설물인 인공어초는 그 안정성과 기능성이 밀접한 상관관계를 가지고 있어 안정성을 상실함은 곧 기능성을 잃는 것으로 이를 유지하기 위한 방안이 필요하다. 인공어초 착저지반의 침하, 파괴를 막기 위한 방법으로서 사석을 투하하거나 파일을 박아서 기초지반의 지지력을 향상시키는 것 등이 있으나 이는 막대한 경비를 필요로 하거나 실패할 우려성을 가지고 있다. 따라서 경제적인 방법으로 구조물을 개량하는 것이 요구되지만 이에 대한 연구가 미흡하여 설계에 반영되지 못하고 있는 실정이다.

그러므로, 실제 우리나라 해역에 가장 많이 시설되고 있는 사각어초와 연약한 해저지반과의 상관성을 파악하고 현재의 문제점을 찾아 설계에의 개선안을 찾는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에는 정하중실험과 수리모형실험을 통해 그 침하·매물특성을 찾아내고 구체적으로 해저지반에 설치된 인공어초의 침하거동특성을 정적인 면과 동적인 면으로 나누어 검토해 볼 것이다.

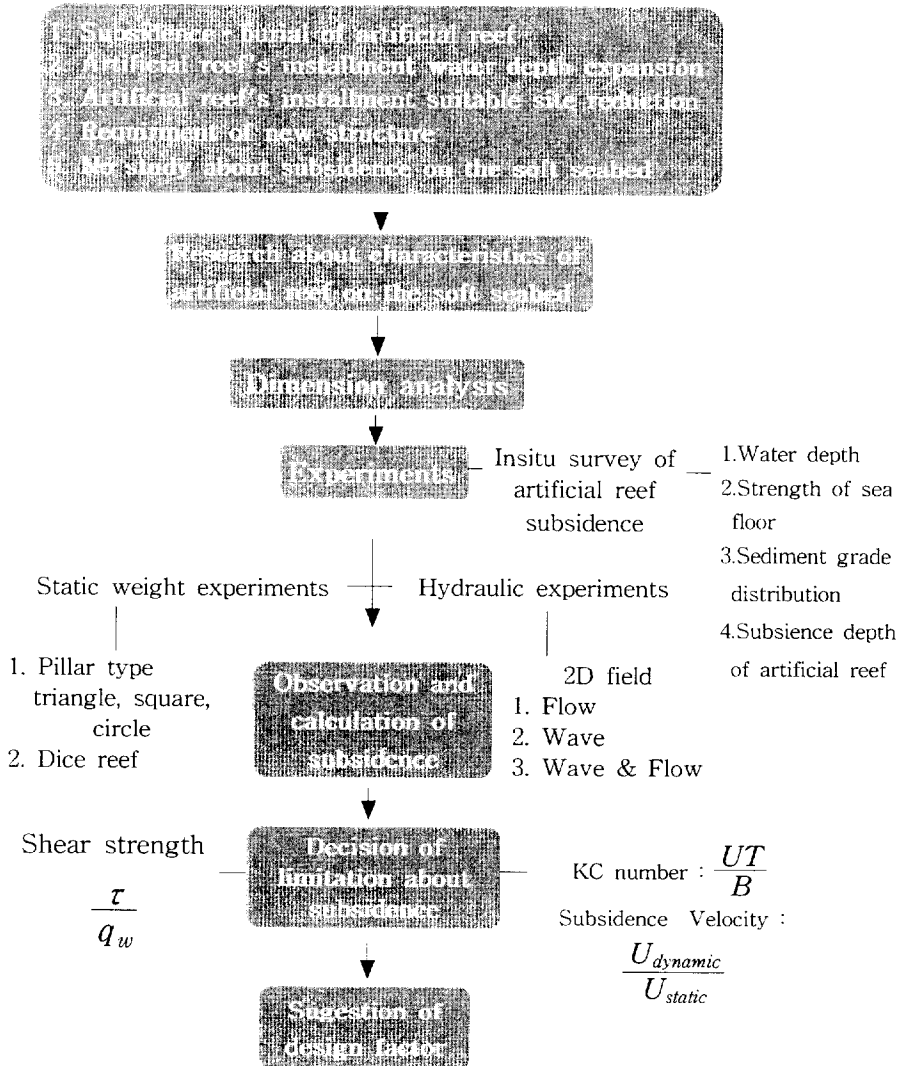


Fig. 2. Flow chart of this study.

2. 인공어초와 연약해저지반

인공어초는 해저 또는 바다속에 지형적 변화를 주어 대상 수산동·식물을 끌어 모으고, 보호 배양하는 것을 목적으로 하는 어구로서 혹은 증식, 배양을 꾀하는 어장 개량 조성시설로서 중요하다. 이러한 인공어초 어장은 어류 등의 수산생물이 암초, 침물선 등에 모이는 성질을 이용하여 어획 증대와 남획으로부터 보호 육성을 도모하기 위하여 계획적으로 배치하여 조성한 어장이다. 재료로서는 투석·콘크리트어초·강제어초를 시작으로 흰 타이어, 폐선, 고물 자동차, 전차 등의 폐기물 이용도 있다.

2.1 인공어초 시설수심 및 시설위치

한국에서 시설되고 있는 인공어초는 대상으로 하는 생물에 따라 시설수심이 다르나 대개 70m 이내에 시설되고 있다. 인공어초 어장 조성을 위한 수심은 대상으로 하는 수산자원 및 자연환경요소에 따라 선정되는데 대체로 대륙붕 이내 해역으로 육지의 영향을 받아서 영양염이 풍부하고 염분, 수온, 수소이온농도, 일사량, 조류, 저질이 다양하고 해양의 일차생산의 장소로서 어업자원가치가 높은 곳이어야 한다. 이에 대한 상세한 요건은 Table 1에 나타내었다. 일차생산력은 수심이 얕을수록 육지로부터 가까울수록 증대하기 때문에 자원증식을 위한 어초시설 수심으로서는 일반적으로 30m 내외가 적합하다. 어획용 어초시설 수심으로서는 4~5m에서 대륙붕 연변까지를 대상범위로 할 수 있지만, 어초 어장의 시설 관리 측면을 고려하면, 최고 수심은 130m, 최저 수심은 4m, 최다 수심은 20~40m가 된다(2000, 해수부). 한편, 인공어초 어장 적지로서 적합한 해저지형은 평탄한 곳, 자연초와 가까이 있는 곳, 용기부가 있는 곳과 급경사, 함몰된 지형이 있는 곳이어야 하며 시설지역의 저질로서는 clay, silt, mud가 아닌 sand, mud sand등 침하의 우려가 작은 곳이어야 한다.

Total installed area : 152,000ha

Total installed expense : 470,100,000,000won
(1971~2000)

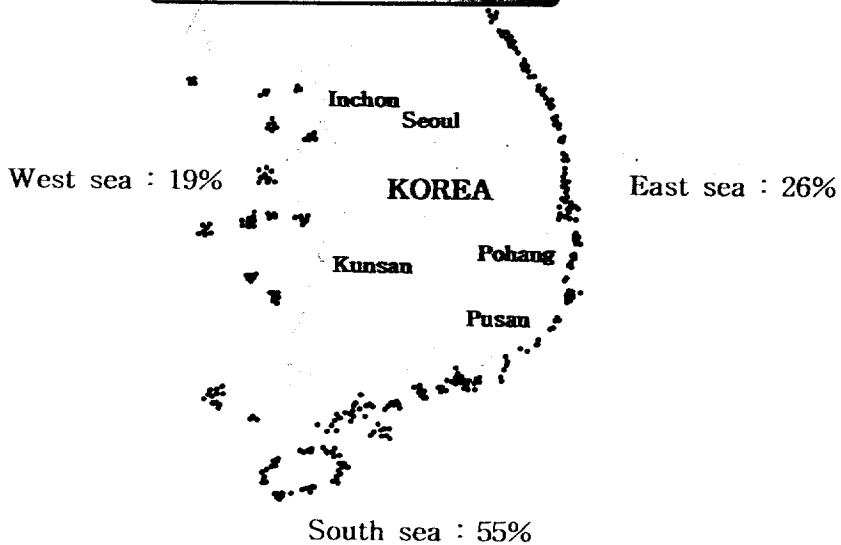
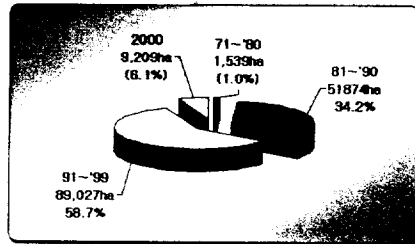


Fig. 3. Map of artificial reef's arrangement(Kim, 2000). Blue letter shows installed quantity of artificial reef.

Table 1 Vital point of compatible region survey of artificial reef institution(NFRDI, 2001)

survey content	survey method	judgement condition of suitable site
water depth	echo sounder	5~70m
dissolved oxygen(mg/ ℓ)	divided measurement (outer, bottom layer)	more than 5mg/ ℓ
potential of hydrogen	"	6.5~8.5
velocity	current/direction meter	less than 2 ^m /s (lowest low water)
submarine topography	echo sounder	flat sea area less than 1/20(slope)
mud	judgement of mud (mud : particle of less than 0.062mm is more than 90%)	seabed where isn't composed of mud
native reef	existence of native reef near sea site of suitable survey	sea area where haven't native reef within 400m
seaweed(reef for coastal settling marine products living)	seaweed habitat site survey	seaweed habitat site. (but, if sea area where seaweed doesn't habitat, suitable site where use seeding yarn and where propagation of seaweed is possible)
environmental pollution		a site where isn't concerned about environmental pollution

2.2 연약해저지반의 공학적 특성

연약지반은 거의가 현세에 퇴적된 새로운 지층인 충적층으로 이루어져 있으며, 수천년전부터 퇴적, 침식, 재퇴적, 지하수의 변동 및 지진 등의 외력 또는 화학적인 변화 등을 별로 받지 않은 연약한 점토, 실트, 유기질토 또는 느슨한 사질토층이다. 대개 연약토라고 부르는 흙은 주로 점성토로 구성되어 있고 해성, 호성층에는 패류, 표토나 유기질토에는 다량의 초근류가 함유되어 있다. 일반적으로 연약지반은 압축성이 크고 지지력이 작아 역학적으로 불안정한 상태를 나타내므로 지반상에 구조물의 시공을 수행하는 경우 지반침하 및 파괴가 발생하여 대책공법의 수립이 필요한 지반이다. 연약지반을 이루는 있는 토립자의 비중은 이탄토가 2.3 이하, 유기질점토는 2.3~2.65, 점토 또는 점성토는 2.6~2.7, 사력, 모래 또는 사질토가 2.65~2.75의 범위이다. 자연지반의 함수비는 토립자의 크기, 성분, 지하수의 상태 또는 퇴적속도 등에 따라 차이가 많으나 일반적으로 함수비는 사력이 20% 이하, 사질토 30~40% 이하, 연약점성토나 점토 100% 이하이며, 유기질토에서는 100~300%, 이탄은 300% 이상이 보통이다. 액성한계는 자연함수비보다 높게 나타나는 것이 보통이다. 단위중량은 점성토가 1.4~1.7gf/cm³, 사질토가 1.6~2.0gf/cm³, 이탄토 1.05~1.1gf/cm³의 범위가 일반적이다. 모래는 연약함을 상대밀도로 나타내고 점토는 굳기(consistency)로 나타내는데 모래의 상대밀도가 35% 이하이면 느슨하게 퇴적되어 있는 상태이므로 연약한 지반으로 분류하게되는 것이다. 한편 육상의 경우에는 현장에서 표준관입시험을 하여 연약정도를 판정할 수 있다. 점토지반에 있어서는 일축압축강도, q_u 가 0.50kgf/cm²($c=0.25\text{kg/cm}^2$, $\phi=0$) 이하인 점토는 연약점토(soft clay)로 분류한다. 일축압축강도가 0.25kgf/cm² 미만이면 대단히 연약한 점토(very soft clay)이다. 표준관입시험을 수행하였다면 $N < 4$ 이면 연약한 점토, $N < 2$ 이면 대단히 연약한 점토가 된다. 그러나, 점토지반에서 측정된 N 값은 점토의 굳기에 대한 판별뿐만 아니라 전단강도를 추정하는데 있어서도 극히 개략적인 추정치만을 제시하는 것이라는 것을 감안하여야 한다.

Table 2 Soft bed distinction about clay

Consistency	N value	1 axis compression strength,
		$q_u(\text{kg/cm}^2)$
very loose	< 2	< 0.25
loose	2 ~ 4	0.25 ~ 0.5
medium	4 ~ 8	0.5 ~ 1.0
harden	8 ~ 15	1.0 ~ 2.0
very harden	15 ~ 30	2.0 ~ 4.0
most harden	> 30	> 4.0

연약지반으로 분류되면 인공어초에 대해 안정성과 침하의 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 이 대책은 인공어초 하중, 연약지반의 전단 및 압밀특성, 반복하중에 대한 반응특성 등에 따라 달라진다. 지반공학적인 관점에서 보면, 어떤 특정지반을 연약지반이라 말하는 것은 불가능하다고 할 수 있다. 어떤 지반의 연약성 여부는 지반자체가 현재 갖고 있는 강도와 재하 외력의 상대적 관계에 의한 것이기 때문이다.

해성점토(marine clay)는 해중에서 퇴적되어 형성된 점토를 말한다. 해성점토는 염분이 많은 해중에서 퇴적되었으므로 면모구조를 가지며 간극비가 커서 압축성이 대단히 크다. 우리나라 연안일대에 퇴적된 점성토는 해수면의 변동과 매우 관련이 깊으며 그 두께는 지역에 따라 차이는 있지만 최대심도가 대략 20m내외이다. 연약지반의 해성점토층은 김포에서 최대 30m로 발견되었고 다른 지역에서는 10~20m 정도이다. 조수간만의 차가 심한 서해안에서는 실트질이 많으나 동해안 및 남해안의 점토층은 대단히 연약하며, 특히 동해안 등에서는 액성한계 120%를 넘는 초 연약지반이 발견되었다.

Table 3 Marine clay of Korea(Tojigaebalgongsa, 1993)

Region	Nature water ratio, %	Water ratio, %	Plastic Index, %	Porosity	Relative density	Organic content
Pusan	58~84	58~64	10~58	0.76~2.85	1.1~8.3	3.12
Masan	42~78	31~52	11~25	1.36~1.82	-	-
Masan guegok	101~148	107~130	58~82	2.81~3.48	-	-
Yosu	84~111	74~97	31~65	2.47~2.99	-	3.92
Sokcho	83~155	62~145	29~95	2.88~3.89	-	7.07
Nakdongang	27~55	32~53	19~27	0.75~1.45	2.2~13.3	-
Banwoul	24.1~57.1	27.2~45.2	11.0~25.7	1.28~1.84	-	-
Gyangyang	18.0~92.2	22.3~87.8	8.6~63.6	0.58~3.02	-	-
Youngsangang	47.1~68.7	32.4~55.6	16.6~30.1	1.45~2.23		
Gangwoun	64~226	144~150	92~93	3.8~5.04	-	-
Youngjongdo	30~50	26~50	16~25	0.9~1.3		

1) 저질조성과 분류

다양한 수산자원의 증가를 위한 인공어초는 그 목적에 따라 설계된 후 적지조사를 통한 현장의 적합성이 우수할 경우에만 시설하게 된다. 특히, 저질과 관련된 적합도는 입도분포로서, 니질이 90% 이상일 경우에는 인공어초를 시설하여서는 안된다.

인공어초 시설해역에 대한 현장조사에(2001, 수진원) 따르면, 사각어초등 여러 인공어초는 Sand~Clay(10~90%의 니질)의 다양한 입도조성을 가진 해저지반에 설치되어 있다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 FOLK(1954)의 방법으로 저질의 조성을 나타내었다.

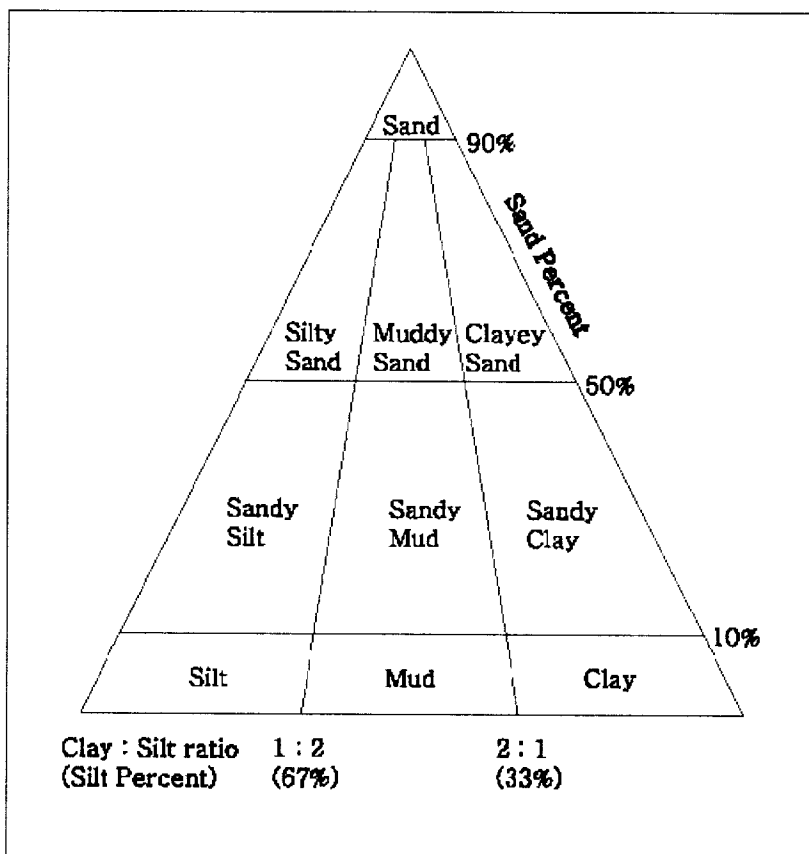


Fig. 4. Distribution of mixed sediments(Folk, 1954).

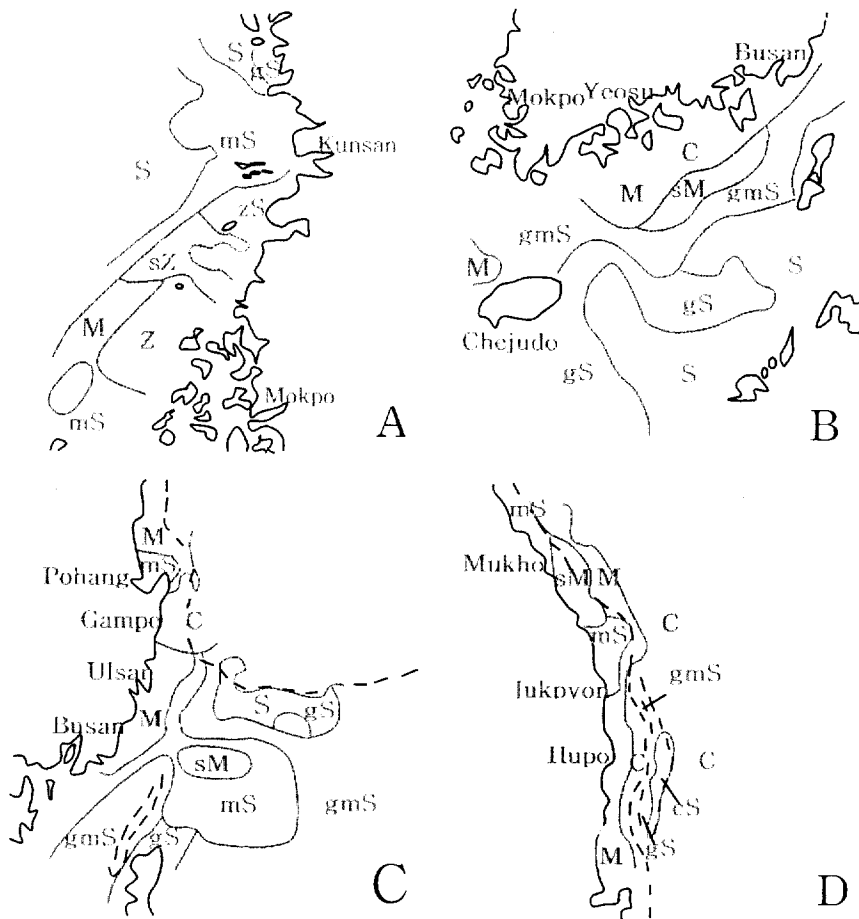


Fig. 5. Distribution of sediment types(Dashed lines: 200m depth) A: West Sea, B: South Sea, C: Southwest Sea, D: East Sea(Choi, 1993).

2) 해성점토의 구조

인공어초가 해저지반 위에서 그 안정성을 확보하기 위해서는 지지력이 커야하며 지지력은 그 흙의 구조와 밀접한 관련성을 가지고 있다. 점성토의 구조에 관한 연구는 Terzaghi나 Casagrande의 시대로 거슬러 오를 수가 있다. 초기의 구조는 단순히 미세함이란 의미에서의 입자배열에 불과하였으나 물리화학이론의 발전에 따라 점성토구조의 기본모델을 제시할 수 있게 되었다. 그러나 이것들도 실제의 입자배열을 직접적으로 설명한 것은 아니었다. 그러나 최근 분석기술의 눈부신 발전에 의해 점성토의 미세구조에 직접 접근 할 수가 있게 된 것이다.

점성토구조는 간단히 다음과 같이 나눌 수 있다(흙의 물리학, 1993).

(1) 랜덤구조

입자간의 반발력이 인력에 비하여 클때에 생긴다. 담수중에서 자연 퇴적 되었을 때가 이것에 해당한다. 또 교란된 점토시료등을 예로 들 수 있다.

(2) 면모화구조

입자사이의 반발력이 인력에 비하여 작을 때에 생긴다. 해수와 같은 고농도에서의 퇴적이 이것에 해당한다.

(3) 분산구조

담수중에서의 불활성 점토가 자연퇴적되었을 때 혹은 작은 압밀하중을 받았을 때가 이에 해당된다.

(4) 배향구조

큰 압밀하중 등을 받을 점성토지반이 이에 해당된다.

3) 연약해저지반의 전단강도

자중이나 외력에 의해 흙의 내부에 전단응력이 발생하면 흙은 응력의 크기에 따라 형상이 변한다. 이 전단변형과 동시에 흙 속에서는 전단응력과 전단저항이 생기지만 전단응력이 점차로 증가하여 전단저항의 한도(최대전단저항)에 이르면 흙은 파괴된다. 흙의 파괴시 전단응력, 즉 최대 전단저항을 흙의 전단강도라고 한다.

점성토의 전단강도에 미치는 흙구조의 영향은 상당히 큰 것이다. 이것은 외력에 대응하여 생기는 변형이 토립자의 상호이동을 일으키고 그 결과로서 생기는 전단강도는 토립자간의 이동저항이 클수록 커지게 된다.

점성토의 전단시에 대한 응력 변형 관계에서는 면모화 구조에 있어서 피크를 표시하는데 대해, 랜덤구조에서는 대개의 경우 피크가 생기지 않는다. 이것은 면모화 구조의 입자면-단 접촉에 의하는 것으로, 입자상호 이동의 용이성이 랜덤구조에서는 크다는데서 기인되고 있다. 또 흙구조의 차이에 전단강도의 관계는 카오리나이트의 면모화구조, 분산구조와 실트를 포함한 점토의 경우는 동일한 간극비에서 비교하면 면모화 구조의 편이 분산구조보다 강도가 커진다(흙의 물리학, 93).

한편 본 시험에 사용되는 저질층은 함수비가 매우 높은 상태로 일반적인 방법으로는 교란되지 않은 강도를 측정하는 것은 거의 불가능하다. 과거에 이에 대한 연구로서 준서점토의 전단강도를 측정하는 방법에 대해 연구되어진 적은 있다. 흙의 전단강도를 구하는 실내시험에는 직접전단시험, 일축압축시험 및 삼축압축시험등 있지만, 초연약 점성토의 전단 강도는 점착력과 내부마찰각을 명확히 분리하는 것이 어렵다. 따라서, 베인 시험기나 회전 점도계를 이용한 방법이 이용되고 있다. 하지만, 베인시험기는 전단면의 형성이 어렵고 회전 점도계를 이용하는 방법은 슬러리 상태의 강도를 측정하는 가장 합리적인 방법으로 제시되고 있으나 점토의 유동특성의 가정과 변형 속도의 제어 방법에 따라 강도가 크게 달라지는 점에 유의해야하며 부수적인 장비가 많고 정도를 유지하기 어렵다. 이에 대해 새로운 방법으로서 얇은판관입시험(Fig. 6)이 수행되어졌다(Lee, 1994). 얇은판의 관입은 자중, 판의 주면을 따라 발생하는 전단력과 관입된 체적으로 유발되는 부력으로 이루어진다고 가정하고 평형조건을 고려하여 전단강도를 구하는 방법이다.

물을 고려하지 않은 상태에서의 전단강도에 대한 실험적인 식은 (Lee, 1994) 다음과 같다.

$$\tau = \frac{dw/dh - k - t \cdot d \cdot \gamma_c}{2(d+t)} \quad (2-1)$$

dw : 하중

dh : 관입량
 k : 스프링 상수
 d : 판의 폭
 t : 판의 두께
 γ_c : 점토의 단위중량
 τ : 항복전단강도

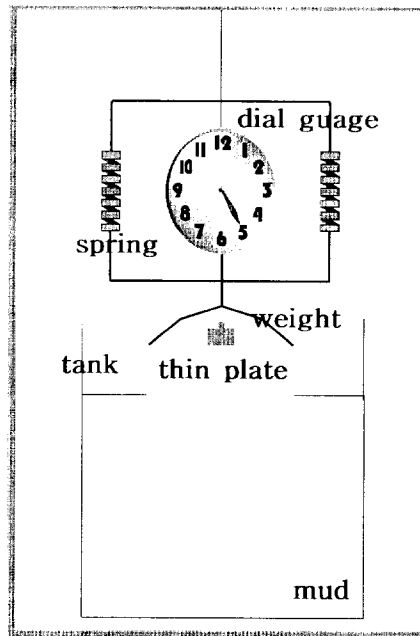


Fig. 6. Static thin plate subsidence instrument(Lee, 1994).

하지만, 물이 차 있을 경우의 저질층의 전단강도는 (2-1)식으로 고려되어질 수 없으므로 이에 물에 잠긴 부분의 체적에 대한 부력항을 추가하여 계산되어야 한다.

(2-1)식에 대해서 얇은판(Table 4)이 물에 잠길 경우의 전단강도에 대한 식은 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$\tau = \frac{dw/dh - P/dh - t \cdot d \cdot \gamma_c - t \cdot d \cdot (l-h) \cdot \gamma_w/dh}{2(d+t)} \quad (2-2)$$

여기서, l 은 판의 높이, P 는 평형조절용추의 중량이다.

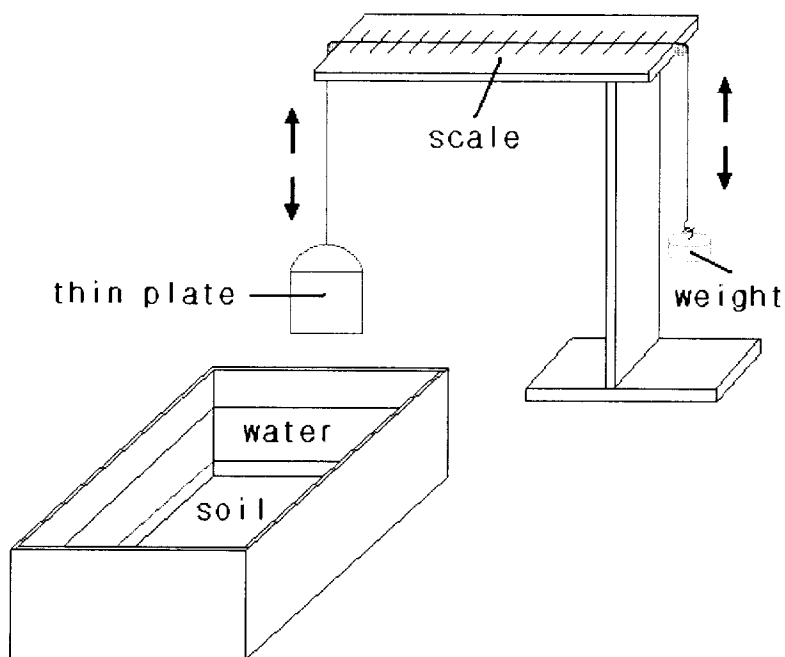


Fig. 7. Modified static thin plate subsidence instrument in the experiment.

Table 4 Size of thin plate

weight	30.60g
thickness	0.05cm
length	16cm
height	5cm

토질역학에서 흙의 함수비가 그 흙의 액성한계와 같거나 크면 그 흙은 정의에 의해서 액체같은 성격으로 하중의 증가에 반응하고 또 그 함수비가 소성한계와 같거나 작으면 그 흙은 고체같이 변형한다고 본다. 흙의 액성한계 실험은 일종의 전단강도 실험이라고 볼수 있다(Burmister, 1960 and Skempton, 1953). 어느 흙이 액성한계 상

태에 있을 때 그 흙의 전단강도는 0.02 kg/cm^2 (Burmister, Ibid)라 하고 Skempton은 0.007 kgf/cm^2 이라 한다. 이것은 흙의 함수비가 액성한계와 같거나 작으면 그 흙은 비교적 강하다는 것을 알려준다. 과거의 예에서는 해저면의 전단강도를 $0.06 \sim 0.08 \text{ kgf/cm}^2$ 정도로 보고한 경우도 있다 (Jakobson, B, 1957).

4) 연약해저지반의 동적성질

연약해저지반에 급속하중이 가해진 경우, 점성이 강한 흙은 유동화 현상은 보이지 않으나 진동에 따라 잔류변형이 일어나며, 흙의 구조체가 파괴되는 수가 있다. 점성토에 급속하중을 가한 경우의 강도는 재하시간이나 입자구조에 따라 크게 다르다. 하중을 주었을 때 어떤 시간에 도달할 때까지는 시간과 함께 약해지나 사질점토나 실트질 점토 등의 다져진 흙은 점성토 특유의 텍소트로피현상이 생겨서 어느 시간이 경과되면 흙은 점차 강해진다. 텍소트로피란 다져진 이후에 시간경과에 따른 강도상승을 말한다.

진동하중이 가해진 경우, 점성토의 영률, 강성률, 프와송비는 입자구조나 함수비에 따라 크게 다르나 보통 다음과 같다. 최적 함수비 이상의 함수량에 있어서는 함수량의 증가와 함께 영률 및 강성율은 감소된다. 최적 함수비 이하의 함수량에 있어서는 함수량의 증가와 함께 영률도 강성율도 증가되며, 함수비, 영률곡선은 최적함수비를 정점으로서 보통 산형곡선이 되는 경향이다. 점성토의 프와송비는 함수량의 증가와 함께 커지며, 범위는 $\mu=0.1 \sim 0.5$ 정도의 넓은 범위이지만, 사질분을 포함한 점성토일수록 그 변화의 범위는 다소 좁은 결과가 된다. 점성이 강한 흙은 진동하중에 의한 유동화현상은 생기지 않으나 잔류변형이 생겨서 파괴를 초래할 우려가 있다. 정하중에 의한 강도는 진동하중에 의한 강도보다 크다. 가속도가 커지면 진동 강도는 작아진다. 함수비가 클수록 강도의 감소는 현저하다. 지진등의 진동하중에 의해 점성토의 강도는 교란된 흙보다 약해지는 수가 있다.

반복하중이 가해진 경우, 점성토의 반복하중에 의한 강도나 변형에 대한 특성은 흙의 입자구조, 함수율, 포화도 등에 현저하게 지배되거나 보통 반복응력이 높을수록 또는 횡수가 많을수록 강도는 증대되

고, 응력 변형곡선의 경사도 증대된다. 점성토의 반복하중에 의한 강도의 증대는 소성한계를 경계로 함수비가 소성한계에 따라 클 때에 경화현상은 크게 나타난다. 점성토의 반복하중에 의한 강도의 상승이나 변형의 증가는 사질토에 비교하여 현저하게 크다. 반복하중을 받은 포화도가 높은 점성토는 시간의 경과와 함께 텍스트로피 현상이 강하게 나타나며 경화가 심하다. 다짐에 의해 경화된 점성토는 큰 변형을 가하면 즉시 경화는 소실된다. 반복하중에 의한 점성토의 밀도는 초기에 크게 증대되나, 강도의 상승은 시간적으로 상당히 지연된다. 이유는 흙의 구조, 입자배열의 변화나 반복하중에 의해 생긴 간극수압의 시간적 저감 등에 의하는 것으로 생각되나 아직 명확하지는 않다(응용토질기초공학, 1994).

5) 파랑에 의한 해저지반의 압력변동

해저지반은 파랑에 의한 반복외력을 받는 특성을 가지므로 육상에서의 지반 거동과는 다르다. 파랑은 해저지반 위를 진행하게 되면 파랑에 의한 에너지의 일부는 물속으로 변화되므로 이에 따라 해저면에서는 동적 하중을 느끼게 된다.

그러나, 육상 구조물이 설치된 기초 지반의 안정성 해석을 위한 종래의 토질역학에서는 유효응력의 개념으로 설명할 때, 정수면이 변화해도 지반중의 유효응력은 불변한다고 설명하여 왔다. 하지만 이러한 가정은 정수면의 변화가 비교적 빠른 파랑하중하에서는 성립이 되지 않고, 지반중의 유효응력은 파랑의 진행과 함께 변동한다고 설명할 수 있다.

미소진폭과 이론을 이용하여 해저지반 표면에 작용하는 수압을 구할 수가 있다. 미소진폭과 이론을 이용하여 해저지반 표면의 수압이 구해지면, 그 수압을 해저지반에 작용하는 외력으로 볼 수 있다. 파랑의 영향이 직접 해저지반에 미치는 문제는, 실제 해저지반과 유체와의 상호작용 즉 파랑과 이동 흙입자 사이의 에너지 전달과 지반의 전단저항에 의한 파랑의 감쇠 등 매우 복잡한 문제이지만, 토질공학적으로 파랑과 해저지반의 문제를 취급하는 경우, 파랑에 의한 해저지반 표면의 수압변동을 미소진폭과이론에 근거하여 모델화하는 것이 많다. 정온시 해저면 수압 P_b 는 다음 식으로 표현할 수 있

다.

$$P_b = P_0 \cdot \sin(\lambda x - \omega t) \quad (2-3)$$

여기서, (P_0 : 수압변동진폭 = $\gamma_w H / 2 \cosh(kh)$, k : 파수, ω : 각속도, H : 파고, T : 주기, L : 파장, γ_w : 해수의 단위중량, h : 수심, t : 시간)

위 식에 의하면, 해저면이 받는 수압은 그 작용이 주기적이며 속도가 빠르고 해면의 수위변화가 그대로 지반에 전달되지 않는다는 특징을 가지고 있다(일본지반공학회, 1998).

2.3 연약해저지반상의 인공어초 침하량 산정

해저지반에 인공어초를 시설하면 지반에 압축력, 전단응력이 작용하고, 그 크기에 의해서 지반이 침하하기도 하고 파괴하기도 한다. 지반의 침하는 흙의 종류와 과정에 따라 다르지만 다음의 세가지로 크게 나누어 볼 수 있다.

- ① 초기에 일어나는 전단변형 : 초기침하
- ② 장시간에 걸쳐 일어나는 배수에 따른 압밀변형 : 압밀침하
- ③ 배수가 사실상 끝났어도 또한 경시적으로 일어나는 크리프적인 변형 : 2차압밀

이들의 각 요인에서 일어나는 침하량을 합한 것이 총침하량이다. 전 침하량이 크게 되면, 구조물의 기능성이 저하됨과 동시에 각 부분의 침하량의 차(부등침하)가 크게 되어, 구조물에 유해한 2차 응력을 일으키기 때문에 침하 예측은 중요한 과제이다.

사질토지반의 침하는 점성토지반의 침하에 비교하여 상대적으로 작고, 점성토지반에서와 같이 장시간에 걸친 압밀침하가 없기 때문에 초기침하를 총침하로 생각해도 된다. 그러나 사질토 지반의 설계하중은 침하로 결정되는 것이 많기 때문에 침하의 평가는 중요하다. 특히, 사질토 지반에서는 크리프변형의 요소가 적기 때문에 침하의 경시적 변화의 정도가 적고, 탱크와 같은 막구조에서는 국부적 침하의 변화가 심하고 부등침하가 나오기 쉬운 등의 문제가 있다.

한편 점성토지반에서는, 인공어초 시설 직후는 비배수 상태의 전단변형에 따른 지표면침하(초기침하)가 일어나지만, 그 후 장시간에 걸쳐 압밀침하가 진행되기 때문에 압밀의 검토가 중요하다(일본지반

공학회, 1998).

또한 해저지반에 착저된 인공어초는 자체의 중량외에도 파랑, 흐름, 지진, 액상화등의 여러 외력조건에 따라 전도, 활동, 침하, 매몰할 수 있기 때문에 동적인 거동특성에 대해서도 상세히 파악할 필요가 있다.

1) 초기침하

초기침하란 인공어초의 시설과 동시에 발생하는 침하이다. 초기침하는 주로 전단변형에 의해 일어나는 것이고, 초기침하량의 추정에는 일반적으로 탄성론이 적용되고 있다.

점성토지반에 있어서 초기침하는 압밀침하에 비해서 훨씬 작은 것이 일반적이다. 과압밀성이 큰 점성토 지반의 경우는, 전 침하량에 포함되는 초기침하량이 점하는 비율이 크서 0.3~0.7 정도로 말해진다. 이것에 대해서 부드러운 정규압밀점토에서는 0.2 이하로 비교적 작다.

초기침하는 재하중이 작을 때는 탄성적이지만, 극한 지지력에 가깝게 되면 지반의 탄성변형 때문에 침하량이 급증한다. 이 경우 지반이 측방으로 크게 변형하기 때문에 이것을 측방 유동으로 부르고 있다. 이 측방 유동은, 지지력에 관한 안전율의 크기에 의해 그 상황이 다르고 또, 압밀과 똑같이 상당히 장시간에 걸친 현상이기도 하고, 현재의 곳에서는 정략적으로 취급하는 방법이 확립되어 있지 않는 것이 실정이다(일본지반공학회, 1998).

① Janbu 등(1956)의 방법

Janbu 등(1956)은 포화된 점성토지반상의 연성기초 아래에서의 평균초기침하량 산정방법을 다음과 같이 제시하였다.

$$S_e = A_1 A_2 \frac{qB}{E_s} \quad (2-4)$$

여기서,

A_1 : 기초 형상(B , L)과 단단한 층까지의 깊이(H)에 의해서 결정되는 계수(침하영향계수)

A_2 : 기초폭(B)과 기초의 근입깊이(D_f)에 의해 결정되는 계수(침하영향계수)

② NAVFAC의 제안식

NAVFAC에서 제안하는 점성토지반의 초기침하량 산정식은 다음의 식에 제시된 바와 같이 전체적으로 Harr의 방법과 달리 단단한 층까지의 깊이 H 가 초기침하량에 미치는 영향을 영향계수 l 을 결정하는 과정에서 하나의 인자로 고려하고 있다.

$$S_e = \frac{Bq}{E} (1-\nu)l \quad (2-5)$$

여기서,

l : 기초형상, 강성, 고려되는 점의 위치, 단단한 층까지의 깊이에 의해 결정되는 영향계수

또한, NAVFAC의 제안식에서는 D'Appolonia(1971)의 수치해석을 이용한 연구결과에 따라 재하과정에서 발생할 수 있는 국부적인 항복의 영향을 고려하여, 기초의 파괴에 대한 안전율이 3이하인 경우, 위의 식에 의해 평가된 초기침하량을 침하량 비(Settlement ratio) SR 을 이용하여 보정하는 방법을 제시하고 있다.

$$corrected S_e = \frac{S_e}{SR}$$

$$SR : \text{안전율의 역수} \left(\frac{q}{q_{ult}} \right), \text{ 초기응력비} \left(f = \frac{\sigma'_{i0} - \sigma'_{i0}}{2S_u} = \frac{1-K_0}{2S_u/\sigma'_{i0}} \right)$$

와 기초폭(B), 단단한 층까지의 깊이(H)에 의해 결정되는 침하량비

③ Harr(1966)는 근입깊이 D_f 가 0이고, 기초바닥면으로부터 단단한 층까지의 깊이 H 가 무한히 큰 지반에 하중이 재하되는 경우의 강성기초 아래 지반의 초기침하량을 다음과 같이 제시하였다.

$$S_e = \frac{Bq}{E} (1-\nu^2)\alpha_r \quad (2-6)$$

여기서,

B : 기초 폭

q : 기초에서 전달되는 순응력

E : 흙의 탄성계수

ν : 흙의 프와송비(포화된 점성토의 경우 = 0.5)

α_r : 기초의 형상, 강성, 고려대상이 되는 점의 위치에 따른 계수(침하영향계수), 단면에 대한 장변의 값이 5배이상일 경우는 1

2) 압밀침하

압밀침하란, 투수성이 낮은 점성토지반이 하중을 받아 내부의 간극수를 서서히 배출하면서 장시간에 걸쳐 체적을 감소해 가는 현상이다. 압밀이 완료했을 때의 지표면의 침하의 양, 다시 말해 흙의 골조구조의 압밀변형에 근거하는 침하의 양을 최종압밀침하량이라고 부르고, 최종압밀침하량은 다음 식에 의해 구할 수가 있다.

① 1차원 압밀 침하량 산정식

1차원 변형 조건에서는 체적변화량이 없으므로 탄성침하량은 0이 된다. 따라서, 전체침하량은 압밀침하량과 같으며 압축과 팽창후 재압축을 하였을시의 침하량은 다음 식으로 나타낼수 있다.

$$S_c = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_r}{1+e_0} \Delta z \log \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{i0}} + \frac{C_c}{1+e_c} \Delta z \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vc}} \right] \quad (2-7)$$

여기서,

n : 압밀층의 개수

e_0 : 초기 간극비

e_c : 재압축선과 처녀압밀곡선과의 교차점의 간극비

C_r : 재압축지수

C_c : 압축지수

Δz : 초기 층의 두께

σ'_{i0} : 초기연직유효응력

σ'_{vf} : 최후연직유효응력

σ'_{vc} : 선행압밀하중

1차압밀이 끝난 후 2차압밀이 발생할 시에 이 2차 압밀량은 압밀층 두께에는 무관하며 시간에 대한 함수라고 할 수 있으며 (Buisman, 1936), Koppejan(1948)은 다음과 같이 제안하였다.

$$\Delta S_c(t) = 2.3 \left[\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \log t_s \right] \log \left[\frac{\sigma'_{i0} + \Delta \sigma_v}{\sigma'_{i0}} \right] \Delta z \quad (2-8)$$

여기서, C_1 , C_2 는 장시간의 Oedometer test 에 구하는 계수이며, t_s 는 2차 압밀침하시간이다.

또한, Raymond와 Wahls(1976)의 경우에는 다음과 같은 간단한 식을 제안하였다.

$$S_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_a}{1+e_0} \Delta z \right)_i \log \frac{t_s}{t_p} \quad (2-9)$$

여기서, C_a 는 2차 압축계수이며, t_p 는 1차압밀이 끝나는 시간이다.

Terzaghi의 식은 다음과 같이 압밀상태에 따라 구분하여 나타낼 수 있다.

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1+e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_0} \quad (2-10)$$

(정규압밀 점토의 경우)

$$S_c = \frac{C_s H_c}{1+e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_0} \quad (2-11)$$

($p_0 + \Delta p_{av} < p_c$ 인 과압밀 점토의 경우)

$$S_c = \frac{C_s H_c}{1+e_0} \log \frac{p_c + p_0}{p_0} + \frac{C_c H_c}{1+e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_c} \quad (2-12)$$

($p_0 < p_c < p_0 + \Delta p_{av}$ 인 과압밀 점토의 경우)

여기서,

p_0 : 기초 축조전 점토층에 미치는 평균 유효 응력

Δp_{av} : 기초축조로 인하여 점토층에 생긴 평균 응력의 증가량

p_c : 선행 압밀 응력

e_0 : 점토층의 초기 간극비

C_c : 압축 지수

C_s : 팽창 지수

H_c : 점토층의 두께

응력의 증가 Δp 는 깊이에 따라 일정하지 않고 깊이의 증가에 따라 점차 감소하게 되는데, 평균응력의 증가는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta p_{av} = \frac{1}{6} (\Delta p_t + 4\Delta p_m + \Delta p_b) \quad (2-13)$$

여기서, $p\Delta$, Δp_m , 그리고 Δp_b 는 기초 축조로 인하여 점토층의 상부, 중앙, 그리고 함에 생긴 응력의 증가량이다.

3. 인공어초의 침하실험

정하중 모형실험 및 수리모형실험을 통해 현장의 조건을 최대한 재현하고 가장 중요한 영향인자를 고려하여 연약해저지반 위에 설치된 모형인공어초의 침하량을 시간에 따라 계측하였다. 일반적으로 점성토에서는 정적인 재하에 대해서 약하며 지진시등의 동적인 외력의 작용이 문제가 되지 않는다(연약지반대책공법, 1999). 하지만, 이것은 육상에서의 조건으로 또다른 외력으로서 흐름과 파랑이 있는 해저지반인 경우는 그 영향을 부가하여 고려할 필요가 있다. 왜냐하면, 육지에서의 연약점토보다 해저인 경우 더욱더 연약하여 미소한 하중도 상대적으로 더 크게 인공어초에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 또한 육상과는 다르게 수평하중, 경사하중이 작용하기 때문이다.

한편, 본 실험은 연약점토를 사용하였기 때문에 일반적으로 사용되는 방법으로 강도를 측정하기가 거의 불가능하였다. 따라서, 얇은판 관입시험(Lee, 1994)을 통한 저질의 전단강도를 측정하였다.

3.1 영향인자에 대한 해석

실험을 수행하기 이전에는 반드시 실험의 정확성, 효율성을 위하여 차원해석을 시행하여 핵심이 되는 물리량간의 관계를 파악하여야 한다. 인공어초의 침하·매몰을 일으키는 기본물리량으로 침하깊이 d_s 를 어떠한 무차원량으로 표현할 수 있는가를 생각하는 것이다.

인공어초의 침하 실험에 고려되어야 할 물리량은 대표되는 특성에 따라 다음과 같이 나눌 수 있다.

①재료에 관한 변수

저질의 입경(d), 공극율(e), 함수비(w), 압축지수(C_c), 저질층의 깊이(l), 탄성계수(E), 저질의 단위중량(γ), 프와송비(μ_s), 저질의 밀도(ρ_b), 물의 밀도(ρ_w), 균등계수(C_u)

②구조물에 관한 변수

인공어초의 중량(W), 인공어초의 형상계수(α, β), 인공어초의 대표길이(D), 인공어초의 접지압(q_a), 인공어초의 수중접지압(q_w), 인

공어초의 밀도(ρ_a), 얇은판의 중량(W_l)

③물리적 특성 및 현상에 관한 변수

중력가속도(g), 하중재하시간(t), 전단강도(τ), 해저경사(i), 침하량(d_s), 최종침하량(d_e), 정적침하량(d_{ini}), 동적침하량(d_d), 지지력(q_u), 해저지반 표면의 수압변동(P_b), 침하속도(U_{sv}), 정적침하속도($U_{stat.}$), 동적침하속도($U_{dyna.}$), 이론식으로 구한 침하량의 속도(U_0)

④파랑 및 흐름에 관한 변수: 파고(H), 주기(T), 파장(L), 수립자속도(V), 수심(h)

위의 변수들은 간단히 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(H, T, V, \rho, \mu, d, h, l, g, D, d_{50}, \dots) = 0$$

이러한 변수들 중에서 본 연구에서 중요시하여야 할 것들은 다음과 같다.

인공어초의 형상계수(α, β), 인공어초의 수중접지압(q_w), 지속시간(t), 침하깊이(d_s), 지지력(q), 해저지반 표면의 수압변동(P_b), 파고(H), 주기(T), 지반의 전단강도(τ)

인공어초의 침하량 d_s 를 종속변수로 하고, 고려된 독립변수에서 D, μ, V 를 반복변수로 하여 Buckingham의 π 정리로부터 정리하고 각 무차원량을 물리적 해석이 용이하도록 정리하면 무차원 침하량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_s}{D} = \left\{ \frac{t}{T}, \frac{VT}{D}, \frac{\tau}{\rho_b V^2}, \frac{V^3 E}{\rho D^4}, \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_w - \rho_b}, \frac{P_b}{\rho_b V^2}, \frac{VD}{\nu}, c_u, \frac{d_{50}}{D}, \right.$$

$$\left. \frac{U_0 t}{h}, \frac{\tau}{q_w}, \frac{H}{h}, \frac{H}{D}, \frac{W}{H^2 \rho_b V^2}, \frac{U^2}{gd_{50}(\frac{\rho_b}{\rho_w} - 1)} \right\}$$

이러한 무차원량 중에서 연약해저지반 위에 설치된 인공어초의 침하에 큰 영향을 미치는 파라미터는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_s}{D} = \left\{ \frac{t}{T}, KC \text{ number}, \frac{H}{h}, \frac{\tau}{q_w}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{U_0 t}{h} \right\}$$

한편 인공어초의 설계·보존·관리차원에서 보다 효율적인 침하량의 예측이 중요하므로 외력에 대한 인공어초의 침하속도를 고려할 필요가 있다. 따라서, 종속변수인 d_s/D 를 침하속도파라미터인

$\frac{U_{dyna.}}{U_{stat.}}$ 로 고려할 수 있으며 침하를 발생시키는 외력의 강도를 시간

과 함께 고려할 수 있다.

이것은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{U_{dyna.}}{U_{stat.}} = \left\{ KC \text{ number}, \frac{H}{h}, \frac{\tau}{q_w}, \frac{d_{50}}{D} \right\}$$

본 실험은 중력의 영향이 지배적이므로 프루드 상사법칙을 사용하였다.

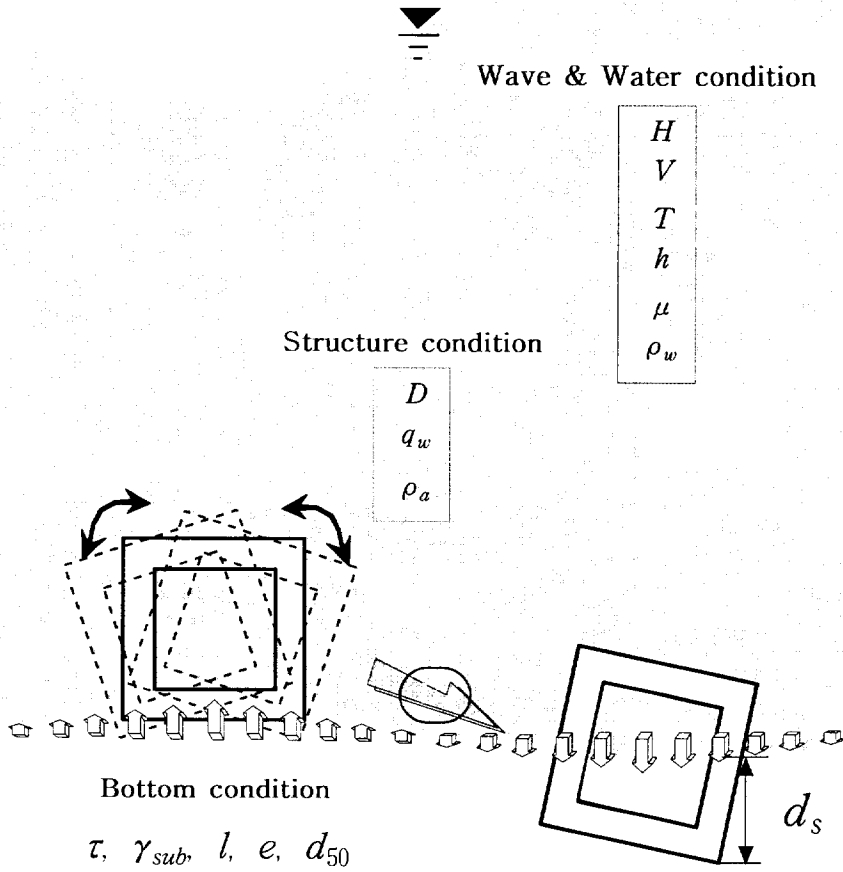


Fig. 8. Conditions for dimension analysis.

3.2 실험조건과 방법

실험에 사용된 저질은 Sandy mud~Mud, 파랑조건은 파고 3~16cm, 주기 0.7~1.5s이며 구조물은 1:44, 1:46의 모형인공어초와 다양한 저면형상을 가진 기둥모형을 사용하였다(Table 5). 계측장비로서는 3개의 용량식 파고계, 1개의 도플러 유속계(adv), 침하량 측정기, 비디오 카메라, 디지털 카메라, 정밀스케일바, 수준측량기, 얇은 판관입시험기를 사용하였다. 실험에 사용된 저질은 대표입경인 d_{50} 이 0.008, 0.010, 0.039mm의 세가지이며 실험에 사용된 2D 조파수조의 제원은 Table 6과 같다. 실험의 주요한 준비단계로서는 먼저 실험조건에 맞는 구조물을 제작하고 미리 준비된 최대한 안정화시킨 저질로 지반을 형성한 후 해당하는 외력을 실험대상영역에 작용시켰다.

우선 저질은 대표입경의 종류가 다른 세가지를 사용하였는데 대표입경0.01mm이외의 저질은 상당히 교란된 상태로서 대표입경 0.008mm 저질은 위의 저질을 표준체로 걸러서 만들었으며 대표입경 0.039mm는 대표입경 0.18mm의 저질을 혼합하여 만들었다. 이중 가장 교란되지 않은 대표입경 0.01mm의 저질로 대부분의 실험을 진행하였다. 교란된 저질에 대해서는 가능한 균질하고 강도를 발현할 수 있는 모형지반을 형성하기 위해 고함수비 상태의 시료를 충분히 교반시킨 후, 침강→퇴적→자중압밀의 과정을 거쳐 충분히 안정화시켰다. 사질토와 달리 점성토는 입경이 작아서 빨리 가라앉지 않으며 교반 후 시간이 경과함에 따라 대개 20~120분 후에 저질층 길이의 변화는 미소하였다. 하지만 지반의 최대안정화를 위해 정하중실험의 경우는 교반 후 최대 1개월, 수리모형실험의 경우 미리 안정화 시켜둔 저질을 저질상자에 넣고 최소 2시간 뒤에 모형을 적재하고 침하량 계측을 시작하였다.

본 실험에서 가장 중요하고 어려운 부분은 침하량 측정으로서 구조물의 여러 위치에 대하여 최대침하가 발생한 곳의 연직최대깊이로 하였으며 비디오카메라, 디지털카메라, 침하측정기, 정밀스케일바를 이용하여 최대한 정확하게 하였다.

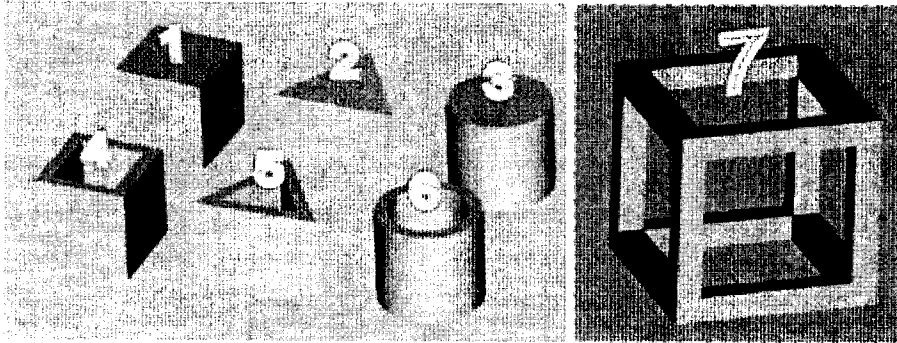


Fig. 9. Model of artificial reef used in the experiment.

(1-3:Pillar type, 4-6:Pipe type, 7:reef(4.5×4.5×4.5cm)).

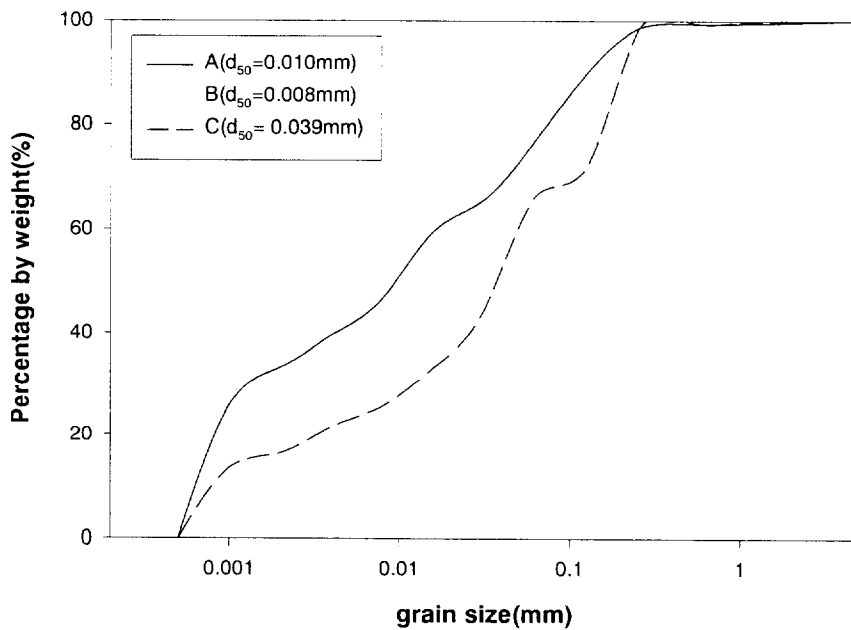


Fig. 10. Grain distribution curve.

Table 5 Hydraulic model experimental condition

Terms	Scale
Wave period	0.7~1.5 s
Wave height	0.03~0.157 m
Similarity rate	1/44, 1/46
Weight of model	24, 34, 39 g
Width of model	0.043 ~0.046 m
Velocity	0.07~0.38 m/s
Wave length	1.54~3.66 m
K.C number	0.5~5.00
Re number	3345~17123
Sediments' shearstress	0.00024~0.0027 tf/m ²
Water ratio	80~85 %
Specific gravity of sediments	2.670
Porosity	2.22
Buoyant unit weight	0.52 tf/m ³
Sediments' box	50×20×7 cm
	26×22×10 cm
Bottom slope	1 : 20, 1 : 40
Installation Water depth	0.26, 0.6 m

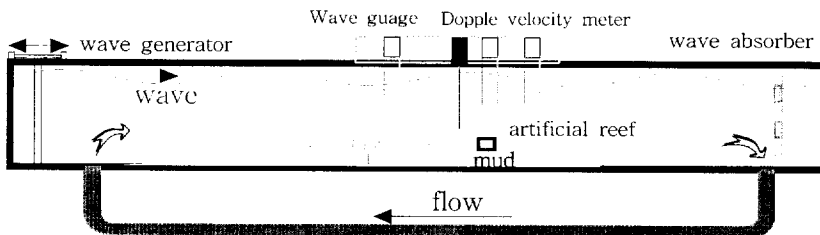


Fig. 11. Arrangement of experimental apparatus.

Table 6 The principal factor of wave-maker system

Arrangement	1.0(w)×1.0(D)×35(L)m App.
wave-maker board	0.98(W)×1.0(H)m App.
maximum water depth	0.7m
maximum wave height	0.3(±0.15m), (front wave board)
wave period	0.5~5 sec
Motor	AC Servo Motor
structure of installment	Self standing
wave-maker type	Piston Type Regular & Irregular

4. 실효역 인공어초의 침하 · 매몰특성

우리나라 인공어초는 기시설 및 시설 예정수역의 상당부분이 사니질, 니질이기 때문에, 시설한 어초가 매몰될 가능성이 높다. 인공어초의 침하는 저질이 모래이거나 입도가 낮은 사니질, 니질이면서 그 층이 두꺼운 경우에 나타난다. 실제 현장에서 저질이 사니질, 니질인 경우에, 사각어초는 10~200cm까지 침하한다고 보고된 바 있다(국립수산진흥원, 2000).

하지만 그 침하량은 인공어초를 시설할 때 선상에서 현수투하시켰을 때의 실측값이며 침하가 완전히 종결된 경우가 아니다. 여기서, 예전에는 어초를 모두 현수투하하여 설치하였으며 사각어초는 이러한 조건을 고려하여 설계되어진 것이다. 그러나 앞으로는 모든 인공어초에 대하여 현수거치하여 시설될 계획이므로 어초 설계에 있어서 이 부분을 중요하게 고려하여야 할 것이다.

Table 7 The depth of maximum subsidence of dice reefs installed at Jangseungpo area provinced in Korea. Reef were installed in 1999. A unit means a reef.

Date of observation	Region	Water depth (m)	Installation state	Depth of subsidence (m)
May, 21, 2001	Jangseungpo	27.5	A unit	0.6~1.30
"	"	27.8	A unit	0.3~0.7
August, 10, 2001	"	29	A unit	0.25
			Being piled up by some reefs	1.40
"	"	30	a unit	0.25
			Being piled up by some reefs	1.50~2.00
"	"	28	a unit	0.25
			Being piled up by some reefs	1.00

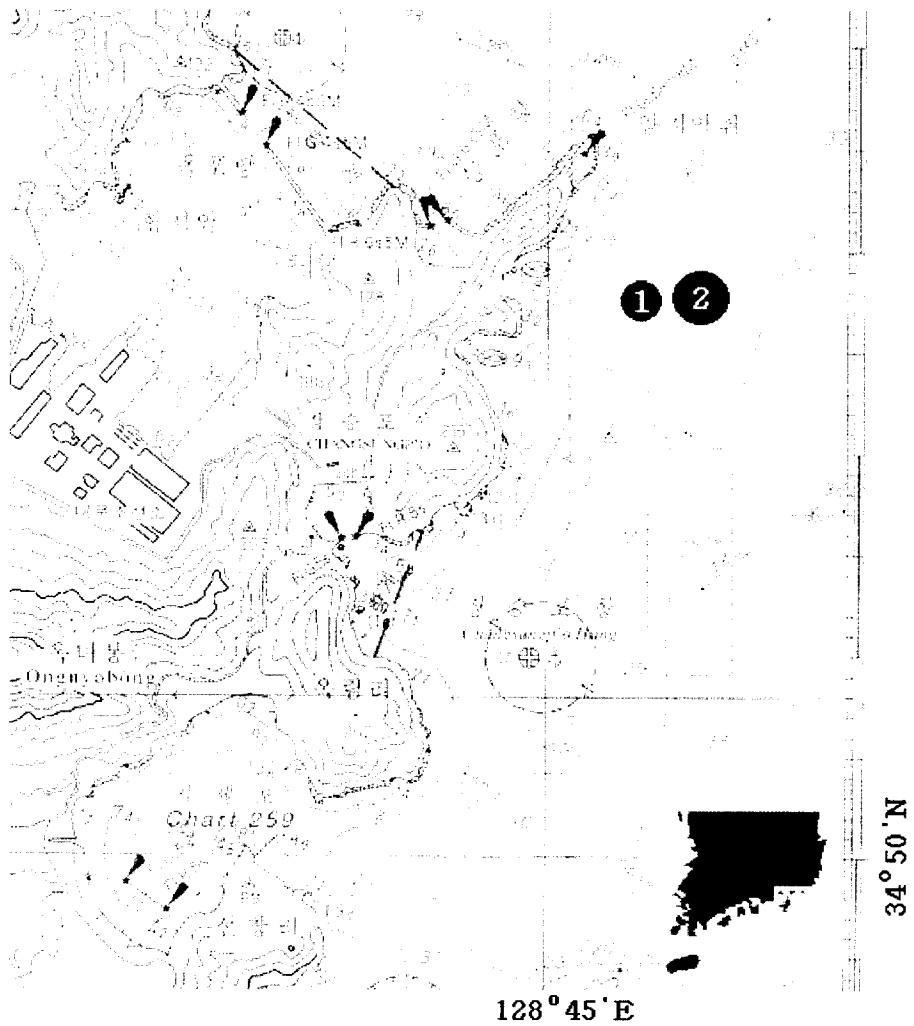


Fig. 12. Location of surveying the state of Dice reef of subsidence(❶ and ❷ in the map gives the site installed by a reef and piled up by some reefs).

Table 8 Insitu observations about immediate subsidence at
Ulsan waters

Observation date	Sediment type	Water depth (m)	Weight by area (t/m ²)	Initial subsidence(m)
August.22, 2001	Mud	20	0.4375	0.02
"	"	"	0.6875	0.03
"	"	"	0.9375	0.08
"	"	31	0.4375	0.09
"	"	"	0.6875	0.10

실험결과와의 비교를 위해 실제 인공어초 설치해역에서 침하량을 조사하였다. 계측은 잠수부가 스케일바를 이용하여 실시하였다. 1999년 11월 장승포 앞바다에 설치된 사각어초의 잠수관찰결과, 1단으로 쌓인 어초는 최대 1.3m, 2단 이상일 경우에는 최대 2m까지 침하하였다(Table 7). 장승포해역은 저질상이 대체로 표층퇴적물을 채취하여 입도분석한 결과 니질~사니질이었다. 해저지반에 착저한 인공어초의 침하를 예측하기 위한 측정장치를 사용하여 실험해역에서 계측한 결과는 Table 8과 같다. 40cm×40cm의 재하판을 가진 장치에 70~150kgf의 하중의 변화를 주었을 때, 초기침하량은 0.02~0.095m이다. 이것은 해저지반에 착저한 후 5분이 경과하였을 때의 침하량이다. 2.3에서 기술한 내용으로부터 총침하량을 예측하면 대체로 0.2~0.48m의 범위가 될 것이다. 표층퇴적물의 관측결과, 저질상은 대체로 사니질~니질이었다.

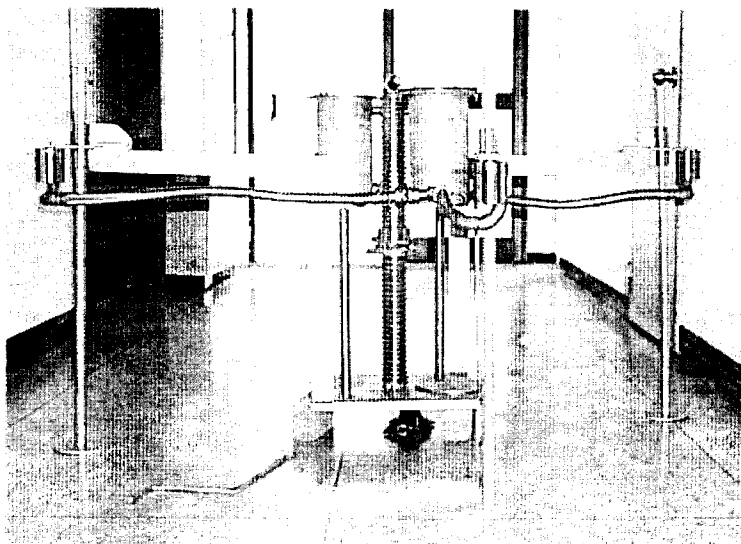


Fig. 13. Initial subsidence measuring apparatus.

5. 정하중조건에서 인공어초의 침하·매물특성

우선 우리나라에 가장 많이 설치된 사각어초와 어초의 형상으로서 가장 많이 고려되는 삼각, 사각, 원형의 저면을 가진 기둥 모형을 사용하여 파랑, 흐름등의 동적인 외력이 없는 조건에서 점성토지반 위에 모형을 착저하여 침하량을 계측하였다. 이렇게 형성된 실험지반은 실제 현장의 조건과 유사하게 이루어졌다고 볼 수 있지만 자체 응집등의 단계를 오랜 동안 거치지 않아(실해역과 비교하여) 그 강도가 매우 작다고 생각할 수 있다. 이를 뒷받침하기 위해 실내용 전단강도 측정기로 실험지반의 강도를 측정하였다.

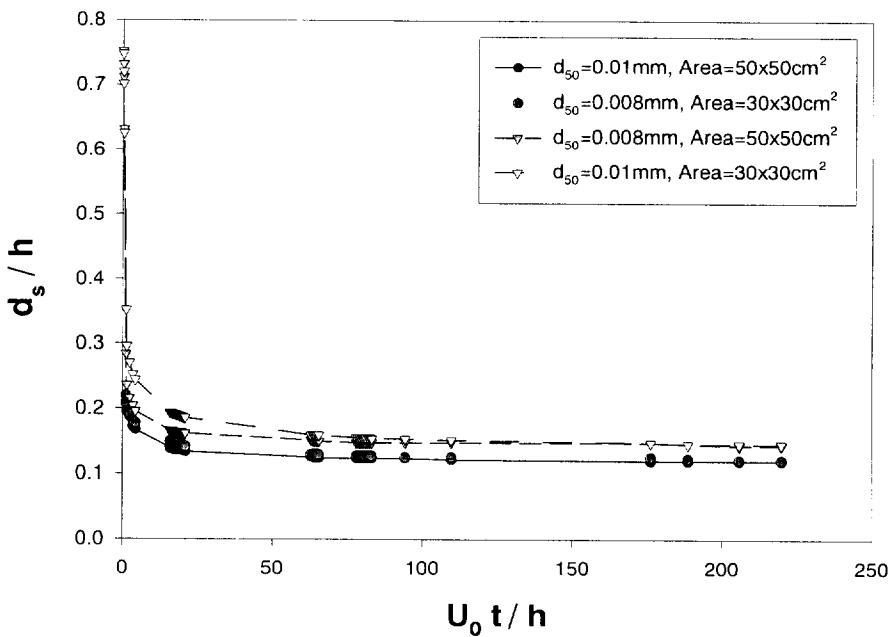


Fig. 14. Stabilization characteristics according to self-weight consolidation of the sediment used in the experiment.

5.1 구조물의 형상변화에 따른 침하·배물

인공어초의 형상으로 가장 많이 사용되는 원, 삼각, 사각기둥모형에 대해 침하특성을 살펴보기 위해 실험을 수행하였다. 이러한 내용은 일부 토질역학에서 다루고 있고 원형을 가장 내침하성으로 논의했으나 삼각기둥모형까지는 고려하지 않았으며 수중에서 수행된 결과는 없었다. 형상에 대한 침하량 실험결과, 원형의 저면으로서는 기둥모형이 가장 내침하성을 가졌는데 이는 중심에서부터 면의 끝까지의 거리가 모두 동일한 형상으로서 접지압의 분포가 균등하기 때문이다. 따라서, 정하중조건에서는 인공어초의 저면형상으로는 원형이 가장 유리할 것으로 생각되며 토질역학에서 다루는 내용을 그대로 적용해도 무방할 것이다. 한편, Fig. 16에서 볼 수 있는 것처럼 각 기둥의 재하로 인해 저질이 측방으로 이동하였는데 형상에 따른 차이가 있었으며 측면으로 많이 이동할수록 침하량이 커지는 경향을 나타내었다. 10~40 일에 걸친 실험기간동안 침하량이 꾸준히 증가하는 경향을 보였으므로 차후에도 계속하여 침하가 발생함을 짐작할 수 있다.

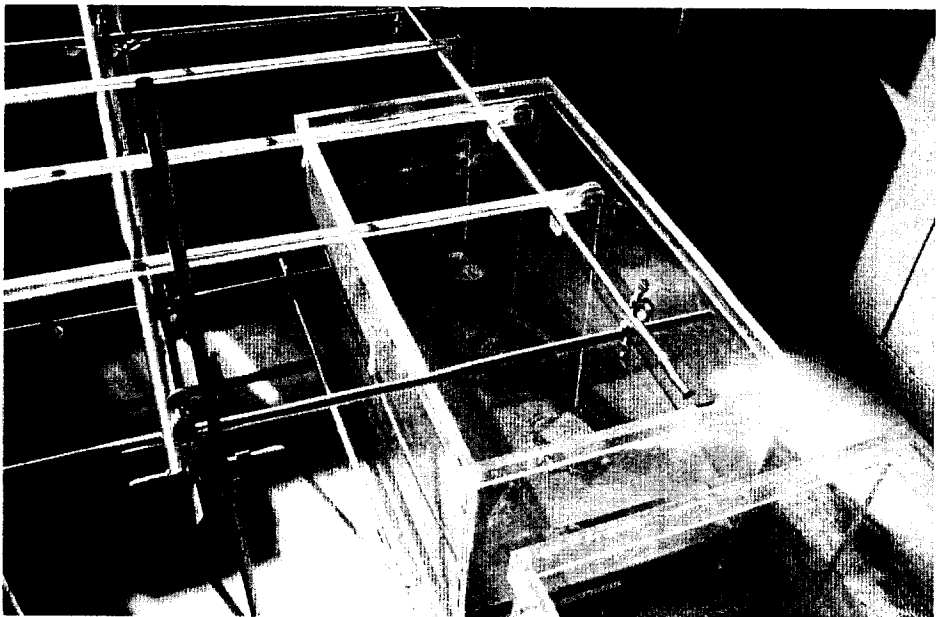


Fig. 15. Subsidence determination instrument.

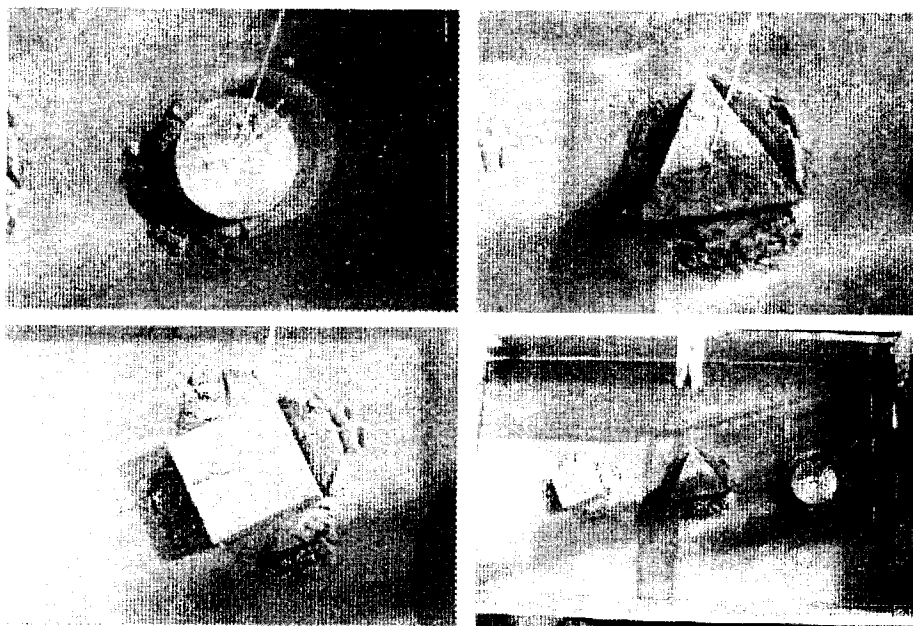


Fig. 16. Subsidence of form(triangle, square, circle) for static condition.

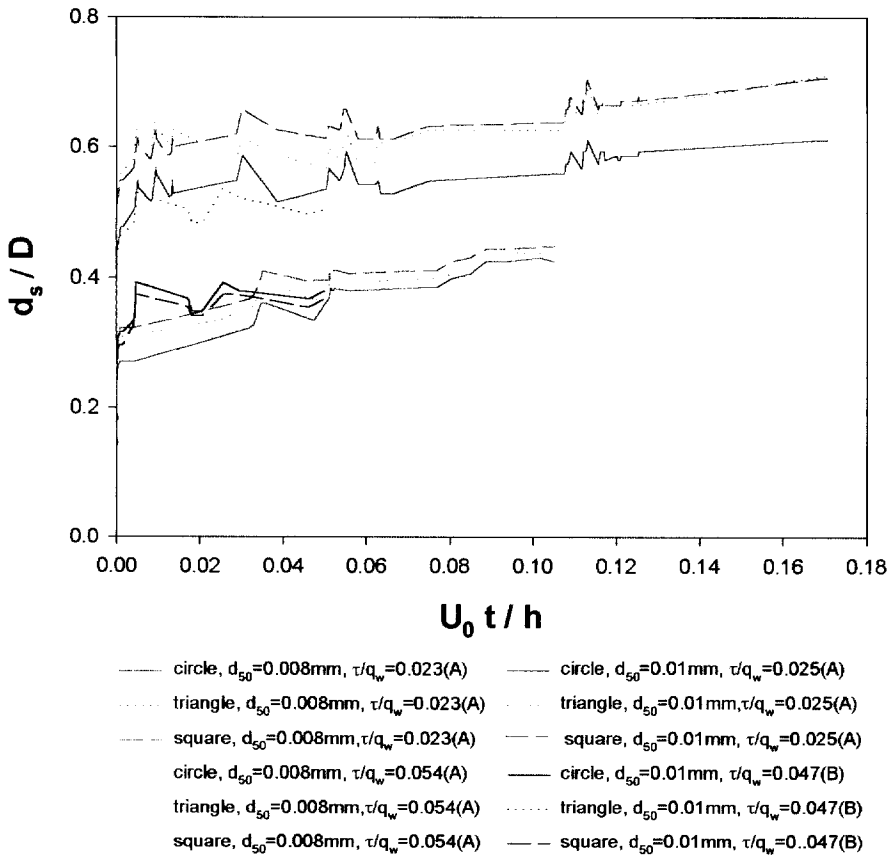


Fig. 17. Subsidence of form(triangle, square, circle) for static condition (A:Pillar type, B:Pipe type).

Fig. 17에서 볼 수 있는 것처럼, 한달여 동안의 실험에서 모든 모형의 총침하량이 모형높이의 70%보다 작게 나타났다. 여기서 U_0 는 4.5cm길이 모형사각어초의 Harr식과 Terzaghi식에 의해 계산된 총침하량에 대한 침하속도로 0.0001m/s이며 h 는 50cm이다.

모형사각어초는 중량이 39 g, 크기 4.5cm×4.5cm×4.5cm인 것을 사용하였다. 초기침하량이 인공어초 크기의 10~15%에 달하였고 시간의 경과에 따라 침하가 점점 완만하게 진행되었다. 그래프상에 보이는 승강현상은 온도변화에 따른 계측기상의(Fig. 17) 에러로 생각되나 계측기의 조건은 동일하므로 결과는 인지도가 있다고 할 수 있다.

5.2 구조물의 하중에 따른 침하·매몰

일반적으로 구조물의 하중이 증가할수록 침하가 크게 발생하게 되므로 인공어초의 설계에 있어 하중은 핵심이 되는 영향인자가 된다. 따라서, 일정하중 및 하중의 증가에 따른 침하량에 대해 살펴보았다.

Fig. 18에 나타난 것과 같이(d_{inst} : 인공어초의 초기침하량, D : 어초의 길이, τ : 저질층(해저지반)의 전단강도, q_w : 인공어초의 수중 단위면적당 중량), 인공어초의 침하량에 대한 정하중실험결과, 전단강도에 대하여 초기침하량은 반비례관계로서 전단강도가 클수록 초기침하량은 작게 나타났다.

본 실험의 결과에 따라, 주어진 실험조건에서 모형사각어초의 침하산정식은 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\frac{d_s}{D} = 0.1628 \left(\frac{U_0 t}{h} \right)^{0.0212} \quad (l = 7\text{cm}, d_{50} = 0.01\text{mm}) \quad (5-1)$$

여기서, U_0 : 이론식에 따른 최대침하속도, t : 경과시간, h : 수심

U_0 의 산정에 있어 탄성계수는 210t/m^2 으로 가정하였는데, 이 값의 값은 토질역학적으로 흙이 매우 연약한 것으로 간주된다. 이 값은 일반적으로 육지에서 사용되는 근사값이므로 본 연구에서처럼 해저연약지반인 경우에는 훨씬 더 작을 것이라고 예상된다.

이 계산값은 토질역학적으로 모형사각어초의 한 부재를 지반과 닿는 주요한 면으로 보아 장방형(장변이 단변의 5배이상)으로 고려하였을 때의 값이다(따라서 초기침하량 산정시의 주요 물리량인 침하계수는 1이다). 초기침하량은 Harr(1966)의 식으로 산정하였으며, 압밀침하량은 Terzaghi의 일차원 압밀침하량 계산식을 사용하였다. Fig. 19는 모형인공어초의 단위면적당의 하중에 대해 침하량의 시간적 변화를 나타내고 있다. 이 모형어초의 크기는 3.4cm 이며 그래프의 곡선은 아래에서 윗방향으로 모형인공어초의 개수가 각각 1, 2, 3개가 쌓여 있을 때이다.

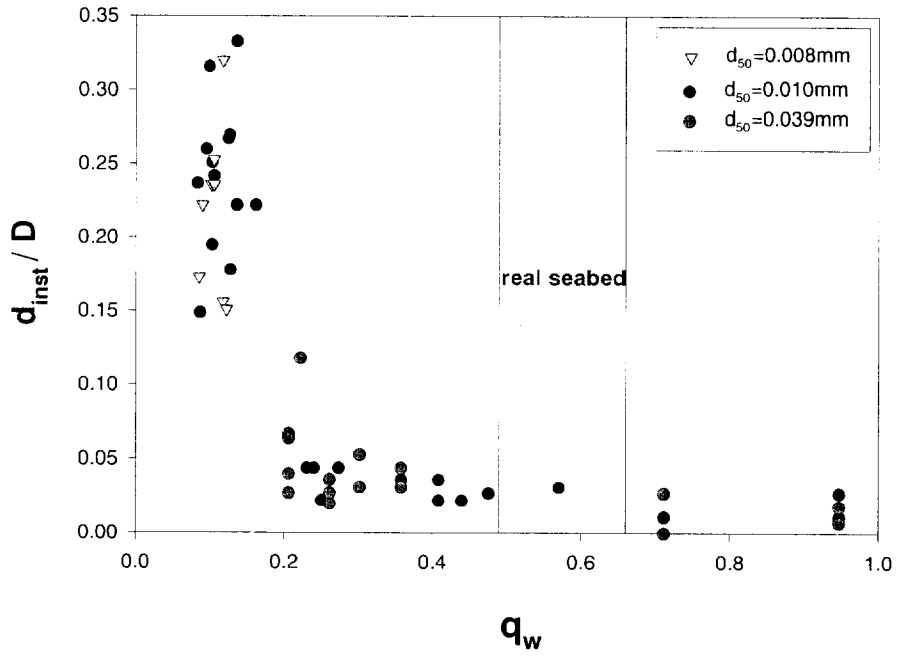


Fig. 18. Initial subsidence of model dice reef according to shear strength by different grain size in the experiment.

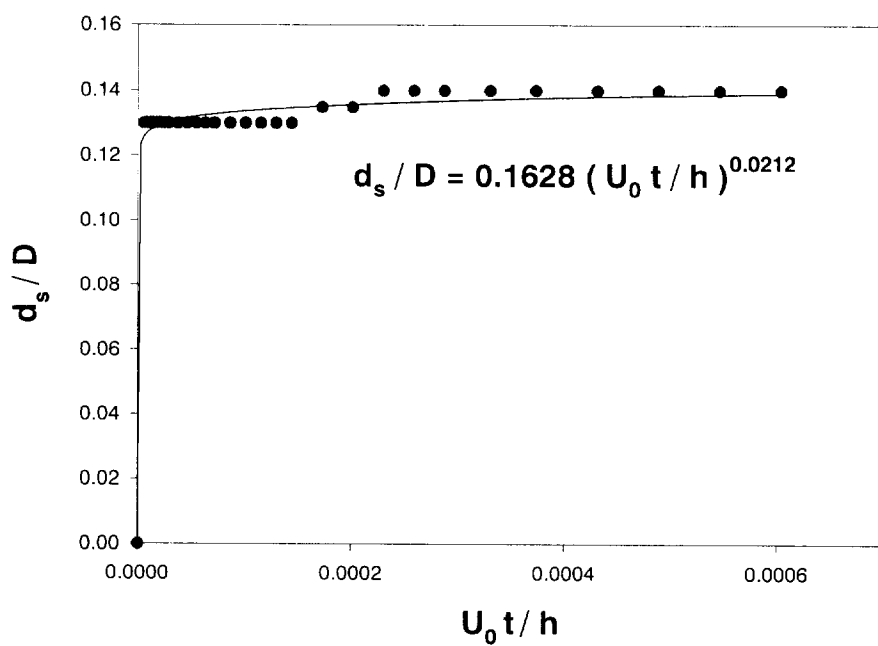


Fig. 19. Subsidence of dice reef in the static weight experiment
($l=7$ cm).

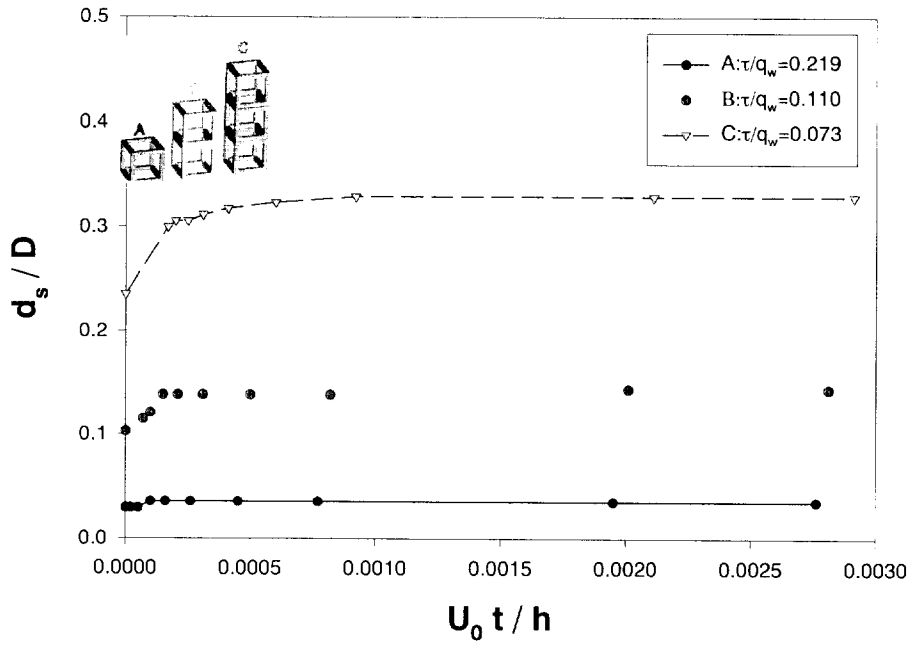


Fig. 20. Subsidence of dice reef used in the static experiment according to weight($l=0.7\text{cm}$).

6. 동하중조건에서 인공어초의 침하 · 매물특성

이상과 같이 인공어초의 정적인 침하에 대해 논의하였고 다음으로 수리모형실험을 통해 침하에 대한 인공어초의 동적거동특성을 살펴보고자 한다. 모형은 우리나라에 가장 많이 시설된 사각어초를 실험조건에 맞게 축소 제작하였다.

총 50개의 실험case로 나누어 실험을 수행하였는데 2차원 조파수조에서 흐름만을 주었을 때, 파랑만을 주었을 때, 그리고 흐름과 파랑을 함께 주었을 때의 모형인공어초 침하량을 계측하였다.

인공어초의 외력에 대한 변화특성은 K.C number의 영향이 크다 (1996, Ryu). K.C number는 구조물과 파랑의 관계를 나타내주는 무차원 파라미터로서 구조물의 대표길이에 대한 파랑의 1주기동안의 수립자의 이동거리를 나타낸다. K.C number는 관성력성분과 점성항력성분의 상대적인 크기를 나타내는데 이 값이 크면 점성항력성분이 지배적으로 작용하고 이 값이 작으면 관성력성분이 지배적이다. 이 값은 정의에서 볼 수 있듯이 파고가 높아 수립자의 속도가 커지고 파랑의 주기가 길어지거나, 구조물의 치수가 작으면 커지므로 파랑하중이 해양구조물의 종류 및 부재와 밀접한 관계를 지니고 있음을 의미한다. 이러한 K.C number는 다음과 같다.

$$K.C\ number = \frac{VT}{B} \quad (6-1)$$

V : 최대수립자속도

T : 파랑의 주기

B : 구조물의 대표길이 ($B=2D$, D 는 구조물의 높이)

인공어초의 안정성에 가장 중요한 부분은 지반과의 상호관련성으로서 구조물의 자중과 형상, 그리고 지반의 강도로 얘기할 수 있다. 저질이 니사질, 사질인 경우에는 어초 주변의 유동 특성에 따라 세굴에 의한 침하와 퇴적, 그리고 매물현상으로 나타나는데 이는 어초의 기능성, 안정성 저하의 큰 원인이 된다. 흐름장의 경우 후류장 변화의 지표인 Reynolds number와 밀접하며 정적 세굴의 형태를 나타내고, 파동장의 경우 K.C number와 밀접한 관계를 보이는 동적 세굴의 형태를 나타낸다.

인공어초의 설치방향에 따른 주변의 세굴 과정 및 특성은 주변 흐름장의 변화 차이에 따라 상이하며, 흐름에 대해 직각방향으로 설치한 경우에 비해 편향(45°)되게 설치한 경우의 세굴 위치가 어초로부터 멀고, 세굴깊이가 깊어 저질개량 효과가 비교적 양호한 것으로 고려된다.

류 등(1994)은 파동장에서의 어초 주위의 흐름 특성 변화는 K.C number를 파라미터로 잘 정리할 수 있으며, 어초 설치에 의한 세굴 발생 한계유속은 모래입경 및 어초 공극율에 관계없이 K.C number가 6 부근에서 급격히 저하하며, K.C number의 증가에 따라 서서히 감소하여 일정치에 접근하는 경향을 보이며, 인공어초 주변의 세굴 깊이 및 침하량은 K.C number와 밀접함을 나타내었다. 이러한 어초 주변의 국소세굴은 어초 주변의 와류, 축류 및 어초 전면의 하강류가 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. 久寶(1987)는 강제어초의 수리실험 결과로부터 어초의 침하하는 지속시간의 1/3승에 비례함을 나타내었다.

이러한 세굴침하 및 저감을 위한 대책으로서는 어초구조 및 부재의 형상 개량에 의한 방법, 어초 전면 하강류의 차단공법, 어초 전면의 경계층 제어 공법, 기초지반의 한계소류력 증대법 등을 고려할 수 있으며, 흐름장에서는 쇄석공법이 양호하다.

하지만, 이러한 실험결과들은 그 저질상이 사실로서 실제의 해저지반은 그 입도분포가 다양하므로 이러한 실험 결과로서 실제의 침하현상을 예측하는 것은 정확하지 못할 가능성이 많다.

연약한 해저지반에 인공어초가 놓여지게 되면 먼저 그 자중과 지반강도에 따라 초기침하가 발생하고 일정시간이 경과한 후부터는 압밀침하가 발생하게 된다. 여기에 파랑과 흐름이 가세하면 인공어초는 더 빠르게 침하하게 된다. 파랑은 해저지반에 압력변동을 일으켜 저질과 인공어초를 진동하게 하는데, 이에 따라 인공어초는 흔들리면서 침하하게 된다. 이렇게 가라앉는 침하 운동을 고정성 유체 중에서 낙하운동으로 생각할 수 있으며 진동이 장시간 계속되면 인공어초는 저질 등의 밀도가 무거운 액체속으로 침하하고 부력을 받아 일부는 묻히고 일부는 떠오르는 상태로 된다. 더 극한 외력조건일 경우에는 완전히 매몰될 수도 있다.

인공어초의 매몰 방지 관점에서의 저질 조건은 다음과 같다.

- ① 저질이 패각, 잔자갈이 섞인 사질대에서는 매몰 위험성은 거의 없다.
- ② 사니질에서는 어초저면 주변이 세굴되지만, 조류 및 저질조성 등의 조건에 의해서 반드시 매몰이 진행된다고는 말할 수 없다.
- ③ 니질에서는 매몰하는 경우가 많다.
- ④ 조류가 빠르고 입자가 가는 모래에서는 단기간에 매몰할 우려가 있다.
- ⑤ 암반지대에서는 매몰의 위험은 전혀 없다.

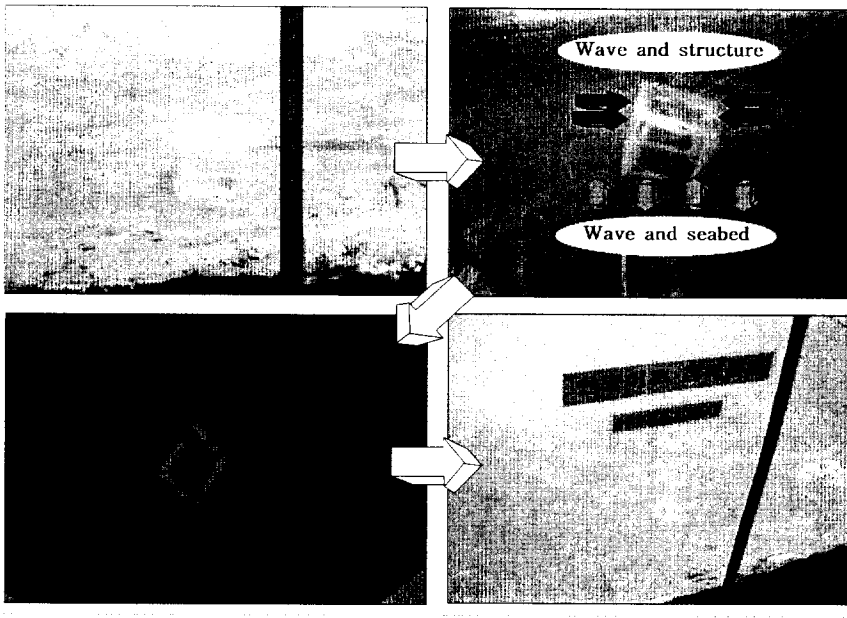


Fig. 21. Process of subsidence.

6.1 파랑장에서의 침하 · 매몰

삼각형, 사각형, 원형의 저면을 가진 기둥형구조물의 정하중실험에서 원형의 저면을 가진 구조물과 도우넛형의 저면을 가진 구조물이 연약해지지반에서 침하에 유리함을 확인하였다. 정하중 실험에 사용된 동일한 세가지 기둥모형에 대하여 수리모형실험을 수행하였다. 사용된 저질의 대표입경은 0.008mm이다. 파랑에 대해 모형인공어초의 침하속도는 원형, 삼각형, 사각형순으로 컸으며 사각형은 초기에 안정화되었다. 따라서 사각형 기둥이 주어진 실험조건에서 가장 내침하성을 가졌다.

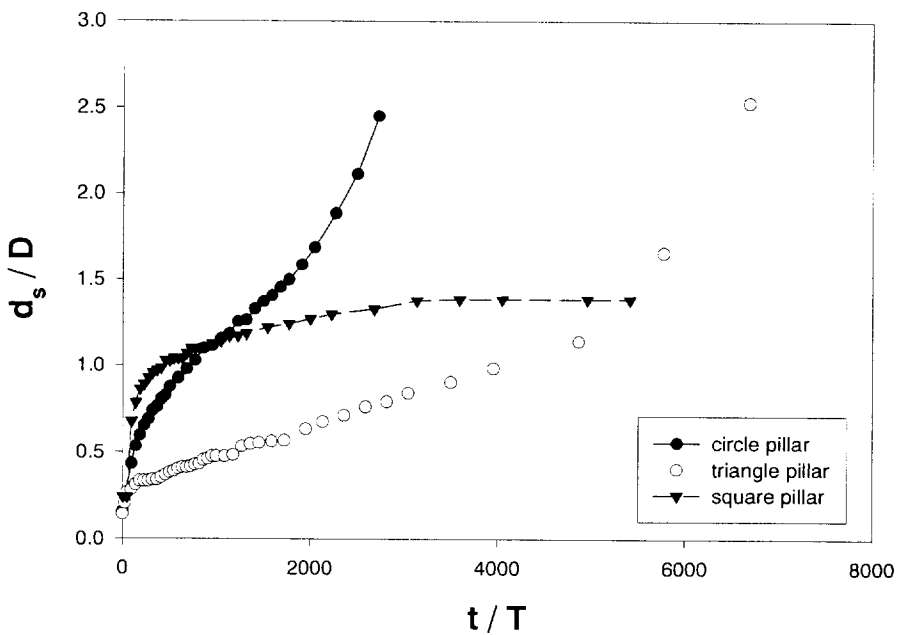


Fig. 22. Subsidence of form(triangle, square, circle) for dynamic condition.

인공어초는 다양한 해양환경에 설치되며 안정성에 영향을 미치는 주된 외력의 종류도 다양하게 된다. 해저지형, 수심등에 따라 침하에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 달라지게 되는 것이다. 이들 인자 중에서 동적인 외력으로 파랑, 흐름을 가장 큰 외력으로 생각할 수 있다. 즉 이를 지배적인 외력으로 간주하여 흐름장, 파동장, 흐름과

파랑의 공존장으로 나눌 수 있다. 흐름장에서는 흐름을 준 직 후 육안으로 구별하기 힘든 미소한 세굴이 발생하였으나 흐름이 안정화되었을 경우에는(흐름을 준 후 1분 이내) 육안으로 확인할 수 있는 세굴이 발생하지 않았으며 침하 또한 발생하지 않았다($V=0.24\text{m/s}$).

본 절에서는 우선 파랑장의 침하특성에 대해 논의하였다. 우선 조파하게 되면 모형인공어초가 지지하고 있는 기초지반이 매우 연약하므로 지반의 움직임과 함께 모형인공어초가 움직이게 된다. 아주 작은 전단강도를 가지고 있지만 안정화된 기초지반은 파랑에 의해 강도를 서서히 잃게 되고 모형의 움직임은 더욱 커지게 되며 결국에 지반은 자체의 전단강도를 거의 상실하여 더 이상 자체로서는 모형인공어초를 지지할 능력을 갖지 못하게 되는 것이다. 결국 동적 침하량은 대체로 K.C number에 비례하여 나타났으며 입경이 클수록 동적침하가 작게 발생하는 경향을 보였다. 파동장에서는 파랑조건에 따라 침하가 발생하는 경우도 있고 발생하지 않는 경우도 있었다.

K.C number가 대체로 1이상일 경우에 침하가 발생하는 경향을 나타내었다.

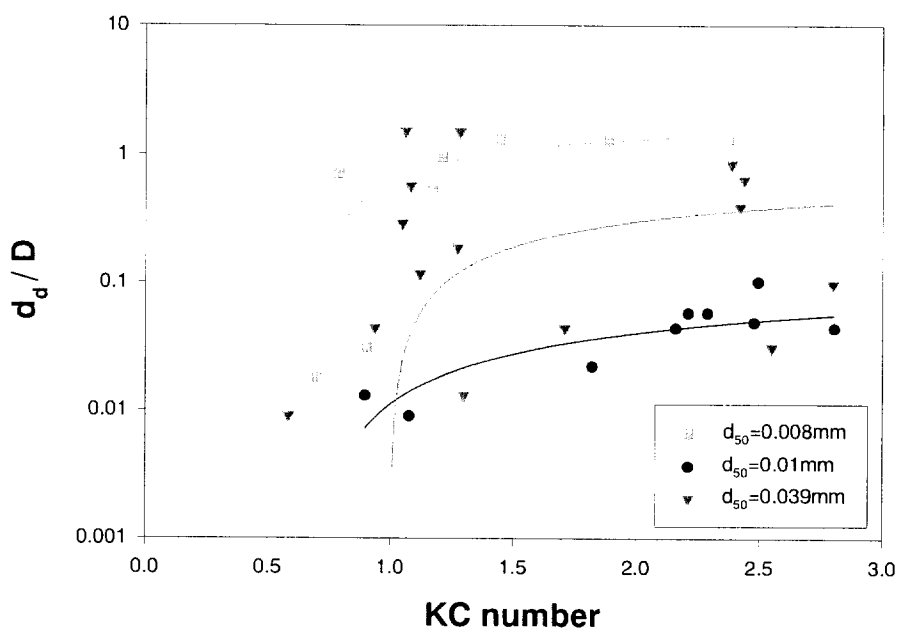


Fig. 23. Dynamic subsidence according to K.C number.

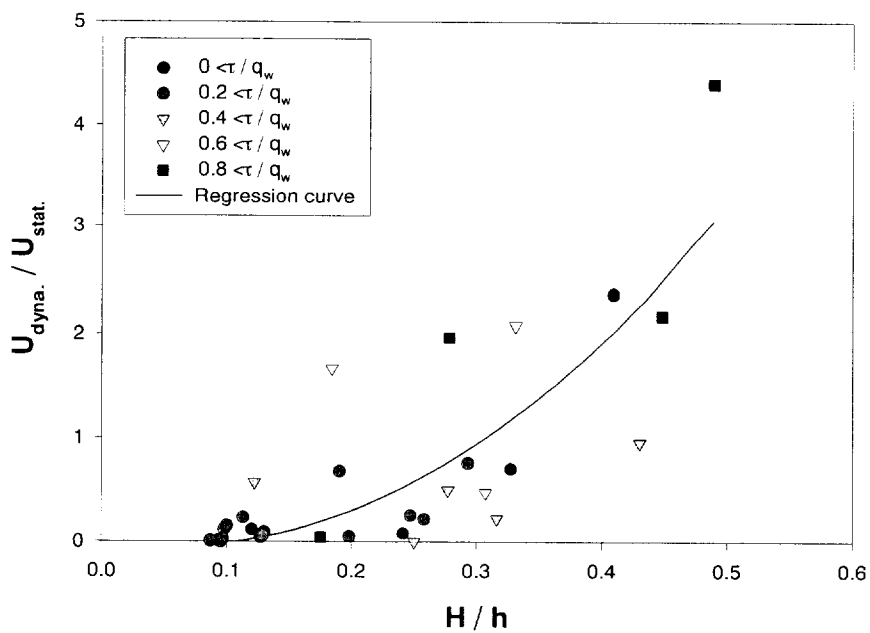


Fig. 24. Subsidence velocity according to relative wave height.

Fig. 24는 침하속도가 상대파고에 따라 급격하게 증가함을 보여준다. 따라서 연약해저지반상에서 인공어초의 침하는 파고에 대해 민감하게 반응할 것이라는 것을 알 수 있으며 구체적으로 파고가 증가함에 따라 초기에는 침하속도가 미소하지만 일정한 파고 이상일 경우에($0.2 < h/H < 0.3$) 전 단계보다 급속하게 침하속도가 증가하게 된다. 다시 말해 이것은 Fig. 24에서 상대파고에 대해 침하속도가 직선이 아닌 곡선적으로 변화하기 때문이다.

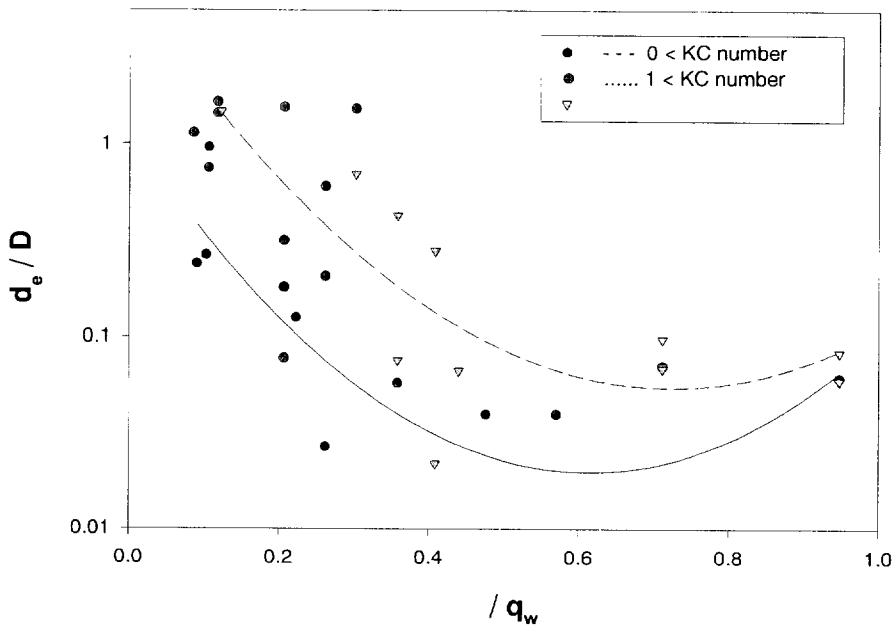


Fig. 25. Maximum subsidence of artificial reef according to shear strength.

Fig. 25는 여러 외력조건에서의 전단강도에 따른 최대침하량을 보여준다. 최대침하량이 전단강도와 반비례관계에 있고 K.C number가 작을수록 최대침하량이 낮게 분포함을 확인할 수 있다. 따라서 연약해저지반의 전단강도는 인공어초의 동적인 침하에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있고 설계·시공시에 반드시 이러한 문제를 고려할 필요성이 있다. 즉, 입도조성만이 아닌 해저지반의 강도특성을 파악하여야 하는 것이다.

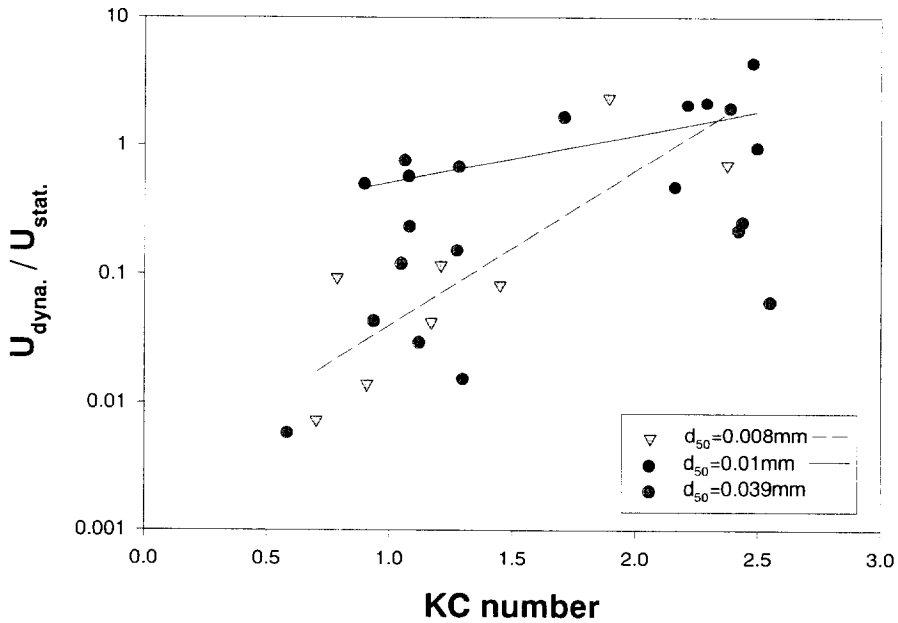


Fig. 26. Subsidence velocity according to K.C number.

모형인공어초는 여러 하중이 주어짐으로써 시간의 경과에 따라 침하하게 되므로 침하의 정도를 침하속도(U_{sv})로 나타낼 수 있다. 이 U_{sv} 값이 제일 크다는 것은 일정 침하량에 도달하는데 걸리는 시간이 제일 빠르다는 것을 의미한다. 즉, 인공어초의 안정성을 파괴하는 외력이 시·공간적으로 가장 크게 작용하는 경우인 것이다.

파동장에서의 최종침하량은 대체로 침하속도에 비례하는 경향을 보여주었다. 침하속도가 크면 상대적으로 최종침하량도 크게 나타나는 것이다. 하지만 공존장에서는 침하속도가 크다고 최종침하량이 크게 나타나는 것은 아니었다.

6.2 파랑장 및 공존장에서의 침하·매물특성 비교

본 절에서는 동적인 침하가 거의 발생하지 않는 흐름장을 제외하고 파동장과 공존장의 침하특성을 비교하였다. 파동장에서 파수가 증가함에 따라 침하량은 증가하였으며 일정 파수이상 일 경우에 안정화되었는데 800파 이상일 경우에는 거의 최종침하량과 차이가 없었다. 실험관찰결과, 파동장에서는 모형인공어초가 파랑에 대해서 전후로 계속 진동하였으며 파고에 따라 저질층이 상하로 진동하였는데 이러한 이유로 인공어초는 침하하였으며 전술한 바와 같이 K.C number가 대체로 1이상인 경우에 동적인 침하가 발생하기 시작하는 것이다.

한편, 파랑장 실험의 경우에는 모형인공어초가 완전히 매몰되는 예가 있었는데 그런 경우 최대침하량은 매몰상태를 외부에서 그대로 재현하여 측정하였다(Fig. 27). Fig. 28에서 볼 수 있는 것처럼, 공존장에서는 파수에 따라 침하량이 증가하였으나 파동장에서의 경향과 비교하여 보다 서서히 최종침하까지 안정화되었다. K.C number가 클수록 대체로 최종침하가 크게 나타났으며 파동장과 마찬가지로 공존장에서도 대체로 800파 이상일 경우 침하량에 큰 변함이 없었다.

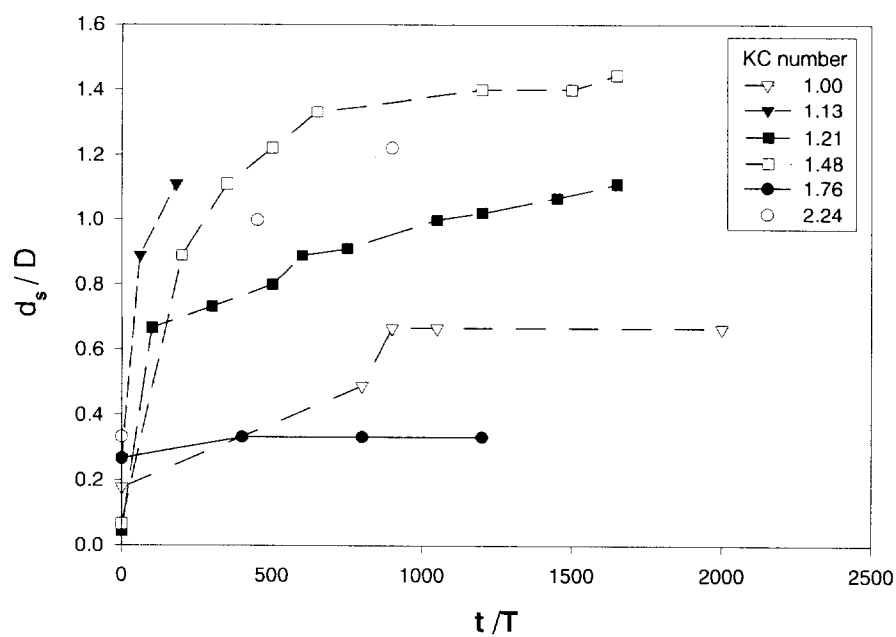


Fig. 27. Subsidence according to time elapse in wave field.

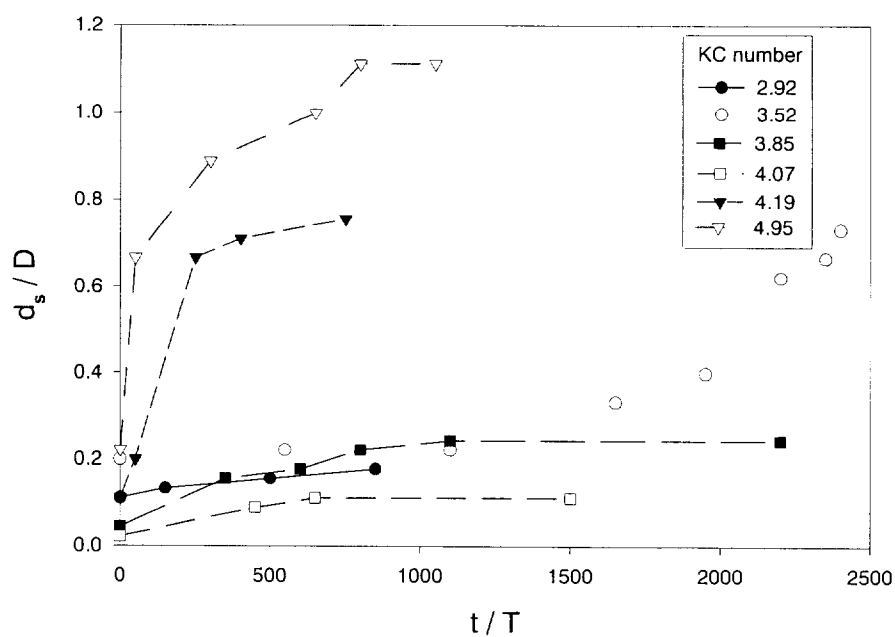


Fig. 28. Subsidence according to time elapse in wave and flow field.

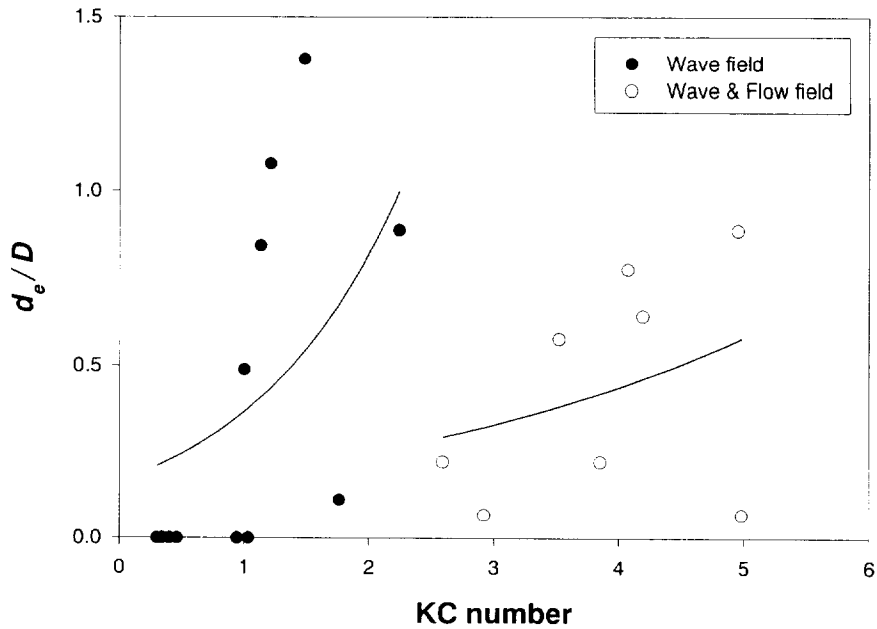


Fig. 29. Maximum subsidence of artificial reef according to K.C number.

Fig. 29는 파동장과 공존장에서 K.C number에 따른 최대침하량을 나타낸 그래프이다. 여기서, 공존장의 K.C number가 파동장보다 더 큼에도 불구하고 최대침하량은 더 작거나 유사하게 분포함을 알 수 있다. 실험 관찰시 저질의 자체거동도 파동장의 경우가 더 컸으며 모형인공어초의 움직임도 파동장이 더 컸다.

인공어초와 같이 수중의 해저지반에 착저하는 구조물의 경우에는 일반적으로 사용되는 정적 침하량 산정식에 더하여 동적인 침하량을 고려하여야 한다.

사각어초의 침하량은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{총침하량} = \text{초기침하량} + \text{압밀침하량} + \text{동적침하량}$$

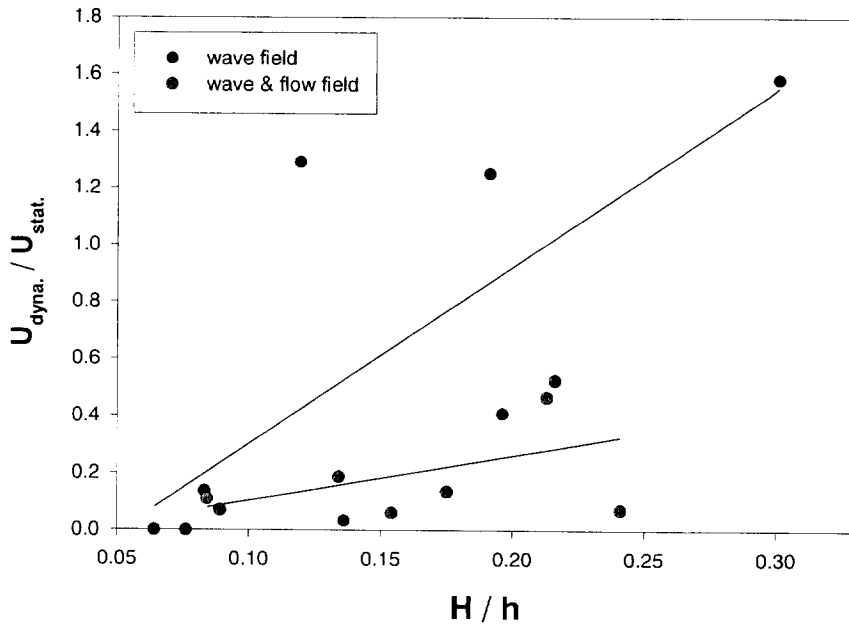


Fig. 30. Subsidence velocity according to relative wave height.

Fig. 30에서 볼 수 있는 것처럼 파랑장에서는 공존장과 비교하여 상대파고가 증가함에 따라 침하속도가 더 크게 증가하였다. 즉, 연약해저지반에서 인공어초의 침하하는 흐름이 공존하는 파랑장보다는 흐름이 없는 단일 파랑장에서 침하가 쉽게 발생할 것으로 예상된다.

7. 결론

인공어초는 점성토지반 위에 시설되면 다양한 외력에 의해 복잡한 거동을 하게 되며 그 특성에 대해 정적인 면과 동적인 면으로 나누어 생각할 수 있다. 처음 지반에 닿으면서 탄성적인 거동을 하게 되며 이후 압밀침하와 함께 파랑과 흐름에 의해 유체력을 받게 된다. 파랑과 흐름은 구조물과 지반에 각각 큰 외력으로서 작용하여 그 크기에 따라 Steady하거나 Unsteady한 구조물의 침하를 일으키게 되는 것이다.

현장조사와 본 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 현장 즉시침하량 측정기를 통해 인공어초가 설치될 지역의 지반 특성을 파악하여 실험상의 지반의 특성과 그 상대적인 크기를 비교할 수 있었다.
- 2) 인공어초의 침하량은 파고 즉 유속의 상대적인 크기에 비례하고 저질의 강도에는 반비례하여 변하지만 느리게 변하는 경우도 있고 급속하게 침하하는 경우도 있다.
- 3) 침하의 메카니즘은 파랑으로 인한 지반의 운동과 구조물에 작용하는 유체력으로 고려할 수 있다.
- 4) 전단강도측정기를 사용함으로써 침하량의 보다 정량화된 자료를 제시할 수 있었다.
- 5) 인공어초의 초기침하량은 전단강도에 반비례함을 확인하였다.
- 6) 인공어초의 동적침하량은 K.C number에 비례하여 나타났다.
- 7) 본 실험의 주어진 조건에서 파랑장에서는 K.C number가 1이상일 경우에 유의적인 침하가 발생할 가능성이 컸다.
- 8) 흐름장에서는 주어진 조건에서 침하가 발생하지 않았고, 파랑장과 흐름·파랑 공존장을 비교하면, 파랑장은 공존장에 비해 침하가 더 빠르게 발생하여 빨리 안정화되는 경향이었으며, 파랑장의 침하속도가 공존장에 비교하여 상대적으로 컸다. 또한 상대적으로 파랑장이 K.C number에 더 큰 영향을 받았다.
- 9) 최종침하량은 대체로 K.C number에 비례하여 나타난다.

차후에는 연약해저지반의 전단강도에 대한 보다더 상세한 규명이 필요할 것이며 본 연구성과를 바탕으로 체계있는 현장실험과 수리모형실험, 나아가 수치모델을 통한 연약해저지반 인공어초의 설계에

대한 연구가 요망된다.

참고문헌

- Noromi Miztani, Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, Coastal Engineering, 1988, 177-202.
- M.H. Kim, Wave interaction with 2D structures on/inside porous seabed by a two-domain boundary element, Applied Ocean Research, 2000, 255-266.
- Dag Myrhaug, Long-term distribution of seabed shear stresses beneath random waves, Coastal Engineering, 1997, 327-337.
- X. Wang, Effects of a cover layer on wave-induced pore pressure around a buried pipe on an anisotropic seabed, Ocean Engineering, 2000, 823-839.
- Dong-Sheng Jeng, Wave-induced seabed instability around a buried pipeline in a poro-elastic seabed, Ocean Engineering, 2000, 127-146.
- R. Salgado, Shear strength and stiffness of silty sand, Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 451-462.
- Paul W. Mayne, Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundation, Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 1999, 324-334.
- Y. S. Lin, Short-crested wave-induced liquefaction in porous seabed, Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 481-493.
- Fred Kofi Boadu, Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new model, Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 739-746.
- H. D. Lin, Stress-strain-time function of clay, Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998, 289-296.
- Kagan Tuncay, Self-weight subsidence of saturated soft porous

- media, *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 630-636.
- Mokoto Nakamura, Evolution of artificial fishing reef concepts in Japan, *Bulletin of Marine Science*, 1985, 271-278.
- Melvin Bell, Charles J. Moore, Stephen W. Murphey, Utilization of manufactured reef structures in south carolina's marine artificial reef program, *Bulletin of Marine Science*, 1989, 818-830.
- Vicharn Ingsrisawang, Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments, *Fisheries Engineering Vol. 32 No. 2*, 1995, 95-103.
- DeWitt O. Myatt, Evelyn N. Myatt, Willaam K. Figley, New jersey tire reef stability study, *Bulletin of Marine Science*, 1989, 807-817.
- Robert S. Grove, Choule J. Sonu, Makoto Nakamura, Recent Japanese Trends in Fishing Reef Design and Planning, *Bulletin of Marine Science*, 1989, 984-996.
- Marco Petti, Wave velocity field measurements over a submerged breakwater, *Coastal Enginnering*, 1994, 525-539.
- Park, Byong-Kee, A study on shear characteristics of saturated clay by critical state concept, *Technological Review*, 1983, 231-247.
- Hirokazu Akagi, A physico-chemical approach to the consolidation mechanism of soft clays, *Soil and foundations*, 1994, 43-50.
- K.I. Mahedha Ranasoma, Velocity measurements close to rippled beds, *Coastal Enginnering*, 1992, 2383-2396.
- Kouki Zen, Hiroyuki Yamazaki, Field Observation and Analysis of Wave-Induced Liquefaction in Seabed, *Soil and Foundations*, 1991, 161-179.
- Roy E. Olson, Fellow, Settlement of Enbankments on Soft Clays, *Coastal Enginnering*, 1988, 659-669.
- Ching-Piao Tsai, Tsong-Lin Lee, Standing wave induced soil

- response in a porous seabed, Coastal Engineering, 1994, 3369-3377.
- Haruyasu Kimura, Vicharn Ingsrisawang and Michikazu Ban, A study on Local Scour of Cylindrical Artificial Fish Reefs, Fisheries Engineering Vol.31 No.1, Japan. 1994. 33-44.
- Chang Gil Kim, Artificial Reef Designs for Korean Coastal Waters, Bulletin of Marine Science, 55(2-3), 1994, 858-866.
- William Seaman Jr., Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats, 2000, 1-235.
- Song Lee, A Study on Strength Characteristics of Dredge Soft Clay, 한국지반공학회, 1994, 153-166.
- H.G.Poulos, Marine Geotechnics, Unwin Hyman Ltd, 1988, 1-473.
- 魚礁綜合研究會, 人工魚礁の理論と實際Ⅰ, 1976, 1-119.
- 魚礁綜合研究會, 人工魚礁の理論と實際Ⅱ, 1976, 1-119.
- 加藤重一, 水産土木概論, 恒星社 厚生閣, 1993, 1-381.
- 류청로, 류연선, 신현옥, 해양목장화를 위한 적정어초 및 설계기술개발, 수산청, 1994, 1-276.
- 정인준, 류건선, 준설토의 기본적 실험연구, 대학토목학회지, 1979, 55-64.
- 일본지반공학회, 해양구조물과 기초, 1998. 1-421.
- 응용토질기초공학, 조충봉 편역, 창우출판, 1994. 1-22.
- 해양수산부, 대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(Ⅲ), 2000, 1-331.
- 해양수산부, 인공어초시설사업의 종합평가 및 향후 정책방향 설정에 관한 연구, 2000, 1-242.
- 현대건설, 초연약 준설매립지반의 특성 및 지반개량기술, 2000, 1-255.
- 한국지반공학회, 얇은기초, 구미서관, 1997, 1-320.
- 토양물리연구회, 흙의 물리학, 창우출판, 1993, 1-312.
- 부경대학교 수산과학연구소, 강제어초 개발 및 효과에 관한 연구, 2000, 1-235.
- BRAJA M.DAS, 기초공학원론, 구미서관, 1998, 1-600.
- 국립수산진흥원, 한국연안 인공어초의 자원조성 효과에 관한 연구,

- 국립수산진흥원 사업보고 95호, 1992, 1-89.
- 류청로, 류연선, 임기봉, 인공어초의 규모와 배치와 관한 연구, 수진연구보고 38, 1986, 1-24.
- 류청로, 김현주, 착저식 인공어초에 작용하는 파력특성에 관한 연구, 한국수산학회지 27(5), 1994, 605-612.
- 류청로, 김현주, 생태계제어 시설물의 설계 및 배치 최적화(1) -연승식 양식시설의 계류력 특성 및 동요저감에 관한 연구 -, 한국수산학회지 28(1), 1995, 35-48.
- 류청로, 이익효, 김현주, 정진호, 수중수산시설물에 작용하는 유체력 및 지반거동의 동적해석, 한국해안·해양공학회 정기학술강연회 발표논문 초록집, 1993, 72-77.
- 김창길, 김태호, 이정우, 김대권, 입체적 어초어장 조성을 위한 다목적용 어초 개발 및 기질 다양화 연구, 수진사업보고서, 1998, 143-162.
- 유한규, 직접전단을 받는 보강점토의 거동에 관한 연구, 한국지반공학회지, 1994, 67-81.
- 유남재, 고경환, 준설토 안정에 소요되는 시간추정 기법, 토지개발기술, 1997, 26-43.
- 송병무, 한국서해안의 연약한 해성 퇴적층에 관한 지질공학적 고찰, 지질공학회지, 1994, 79-90.
- 박종관, Rahman, M.S, 파랑으로 인한 불포화된 다층 해저지반의 거동; 준해석적 방법, 한국지반공학회논문집, 1999, 45-55.
- 강홍윤, 이익효, 해저지반의 액상화와 해안구조물 기초의 안정성, 한국해양공학회지, 1998, 143-152.
- 이송, 윤돈규, 백영식, 준설토 연약 점토의 전단강도 특성에 관한 연구, 한국지반공학회지, 1994, 153-166.
- 해양수산부, 인공어초시설사업집행 및 관리규정, 인공어초표준설계 및 시공등에 관한 지침, 인공어초 적지 및 효과조사 지침, 2000, 1-43.
- 최진용, 박용안, 한반도 대륙붕 퇴적물의 분포와 조직특성, 한국해양학회지, 1993, 259-271.
- 한상복, 박상정, 전경암, 김복기, 하성학, 기장 연안 해양지질조사, 국립수산진흥원, 1996, 1-54.