

침하 저감용 보강재로 보강된 인공어초 설치 지반의 거동 특성

Behaviors of Artificial Reef Reinforced with Settlement Reduction Reinforcement

윤대호¹, 김윤탈^{2*}

Daeho Yun¹, Yuntae Kim^{2*}

¹Member, Graduated Student, Department of Ocean engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48547, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48547, Republic of Korea

ABSTRACT

This study investigated settlement and scouring characteristics of artificial reef reinforced with various reinforcement types to reduce settlement and scouring. Three reinforcement types were prepared: geogrid, geogrid-bamboo mat (GBM) and seaweed-pile mat (SPM). Various laboratory tests such as bearing capacity test, large size settlement test, two-dimensional flow scour test were performed according to different soil types (sand, silt, clay). Laboratory test results indicated that bearing capacity of seabed with a reinforced artificial reef increased and its settlement and scour depth reduced for all reinforcement types. Especially, reinforcement effect tends to be greater in clay soft ground rather than sand and silt grounds.

요 지

본 연구에서는 인공어초의 침하 및 세굴을 저감하고자 다양한 보강재로 보강된 해저 지반의 침하 및 세굴 거동 특성을 알아보았다. 지반에 적용한 보강재는 총 3가지로서 지오그리드(geogrid), 지오그리드-대나무 매트(geogrid-bamboo mat, GBM) 및 해초-지지봉 매트(seaweed-pile mat, SPM)를 각각 보강하여 실험을 수행하였다. 모래, 실트 및 점토 지반에 대해 지지력 실험, 대형 수조 침하 실험, 2차원 흐름 수조 세굴 실험 등 다양한 실내 실험을 수행하였다. 실험 결과 보강재의 보강에 따라 인공어초의 지지력 증진, 침하 및 세굴이 저감되는 효과를 보였으며, 모래나 실트 지반보다 점토 지반과 같은 연약 지반에서 보강 효과가 더 크게 나타나는 경향을 보였다.

Keywords : Reinforcement, A artificial reef, Settlement, Scour

1. 서 론

해양 수산자원의 정착, 증식 및 배양 등과 같은 해양 생태계를 보호하기 위한 목적으로 설치되는 인공어초(artificial reef)는 해양 생물의 생활환경과 특성을 활용한 대표적인 수산자원 조성 방법이다. Carr and Hixon(1997)의 연구 결과에 따르면 Bahamas의 Exuma 섬 부근에서 인공어초와 자연어초(natural reef)의 어군 위집 실태 조사를 실시한 결

과 군집되는 해양 생물의 종류 및 개체 수에 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다. 충청남도 녹도 해역에 조성된 인공어초 시설과 자연 어장과의 어획량을 비교해 본 결과 인공어초 시설에서 전반적으로 약 3배 가량 어획량이 더 높게 나타났다(Park et al., 2001). 또한 최근에는 생태계 기능 회복을 위한 서식지 복원뿐만 아니라 해양 스포츠, 레저 등과 같이 여가 생활 조성에도 이용되며, 그 쓰임새가 점차 다양해지고 있다(Je et al., 2003).

이와 같이 어획량 증진이나 해저 생태계 활성화를 도모하기 위해 설치되는 인공어초는 적합한 지역에 설치하기 위하여 수심, 유속, 해저 지형, 수질 조사, 지반 조건 등

Received 4 Jan. 2019, Revised 18 Feb. 2019, Accepted 25 Feb. 2019

*Corresponding author

Tel: +82-51-629-6587; Fax: +82-51-629-6590

E-mail address: yuntkim@pknu.ac.kr (Y. Kim)

다양한 항목에 대해 적지 조사를 실시한다. 우리나라는 1970년대부터 시작하여 현재까지 지속적으로 시설 사업비를 투자하여 인공어초 어장 면적을 조성하고 있다. 이렇게 설치된 인공어초는 충분한 적지 조사에도 불구하고 파랑, 조류 등과 같은 다양한 영향에 의해 세굴에 의한 매몰과 자중에 의한 침하가 발생한다. 이로 인해 인공어초 각 부재가 만들어 내는 일정한 공간 용적인 유효 공용적이 감소하여 인공어초 기능을 상실하는 결과도 발생한다(Kim et al., 2009a; Kim et al., 2009b).

우리나라 해역에 설치된 인공어초의 상태 조사를 위해 해저 관측 장비(side scan sonar, multi echo beam sounder)를 이용하여 조사한 결과, 설치 위치, 기간, 인공어초의 종류 등에 따라 차이는 있으나 대부분의 조사 지역에서 침하 및 세굴이 발생하여 인공어초의 기능이 일부 상실된 현상이 보고되었다(Kim et al., 2007; Kim et al., 2008; Oh, 2008; Kim et al., 2009; Jo et al., 2010; Lee et al., 2010; Kim, 2011; Lee, 2013). 인공어초의 침하 및 세굴 저감을 위한 기존 연구를 살펴보면 Suh and Kim(2009)은 석션과 일을 인공어초에 적용하여 침하 및 세굴을 방지하고자 하였다. Kim et al.(2005)과 Suh et al.(2010)에 따르면 인공어초의 침하 및 세굴의 발생 원인과 발생량을 저감하기 위해서는 수리학적 요인에 대한 접근 뿐만 아니라 지반공학적인 접근을 통한 분석이 필요하다고 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 해저 연약지반에 설치되는 인공어초의 침하 및 세굴을 저감하기 위해 다양한 보강재를 개발하고 각 보강재를 인공어초 설치지반에 적용하여 지지력 특성, 침하 및 세굴 특성을 알아보았다. 여기서, 사용된 보강재는 총 3종류로서 보강토 공사나 옹벽 시공시 사용되는 토목 재료인 지오그리드(geogrid), 강성에 취약한 지오그리드를 보완하고자 대나무매트(bamboo mat)를 결합한 지오그리드 대나무매트(geogrid-bamboo mat, GBM), 그리고 접지력 증가와 흐름 억제를 위해 하부 지지봉과 상부 인조해초매트가 결합된 해초 지지봉 매트(seaweed-pile mat, SPM)를 이용하였다. 각 보강 조건에 대해 지지력 실험, 대형 수조 침하 실험, 2차원 흐름 수조 세굴 실험 등과

같은 다양한 실내 실험을 수행하여, 무보강된 지반 대비 각각의 보강 효과를 알아보았다. 또한 각 지반 조건에 따른 지지력 및 침하 특성을 알아보기 위해 모래, 실트 및 점토 지반을 각각 조성하여 실내 실험을 수행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서 사용된 지반은 우리나라 동해안, 서해안 및 남해안의 해저지반 분포 경향을 고려하기 위해 동해안, 서해안 및 남해안에서 채취된 해저 지반으로서 각각 모래, 실트 및 점토이다. Fig. 1은 각 시료에 따른 입도분포곡선을 나타낸다. 시료의 입도분포는 체분석기를 이용하여 측정하였으며, 점토와 같은 세립토의 경우 비중계 실험을 통해 입도분포를 구하였다. Table 1은 각각 모래, 실트 및 점토의 기본 물성 실험 결과를 나타낸다. 각 지반을 ASTM (1985)에서 제시한 통일분류법(Unified soil classification system, USCS)으로 분류한 결과 입도가 불량한 모래(SP), 실트질 모래(SM) 및 고소성 점토(CH)로 나타났다. 실제 해저 지반과 유사한 상태로 실험에 사용된 지반을 조성하

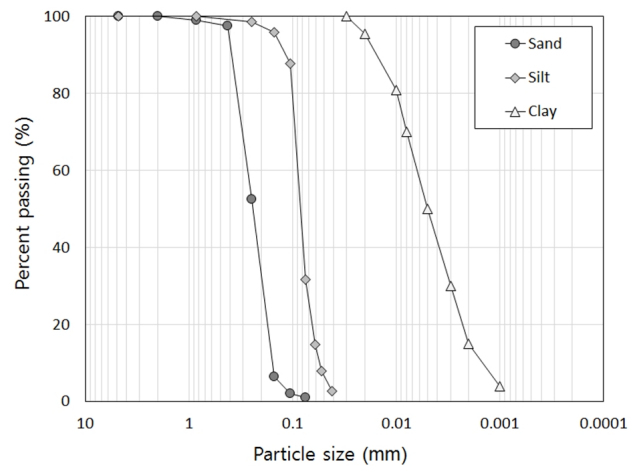


Fig. 1. Particle size distributions

Table 1. Geotechnical properties of soils

Type	D ₅₀ (mm)	C _u	C _c	Liquid limit (%)	Plastic index	Specific gravity	USCS
Sand	0.470	1.81	0.89	N,P	N,P	2.63	SP
Silt	0.085	1.63	1.02	29.6	N,P	2.69	SM
Clay	0.005	4.27	0.94	59.6	28.9	2.79	CH

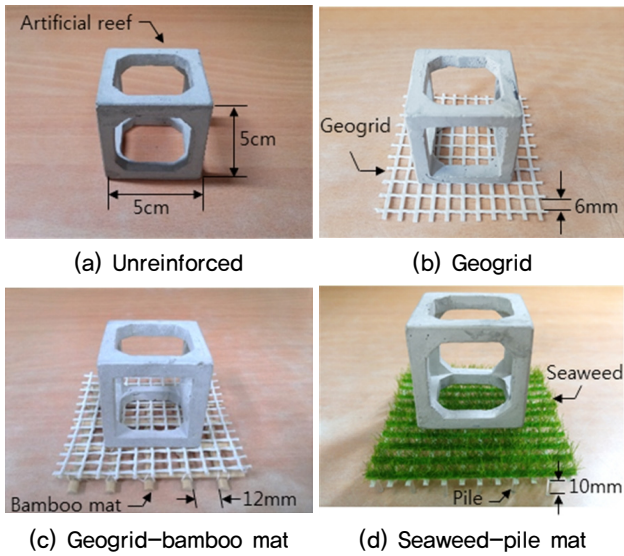


Fig. 2. Reinforced type

고자 수중낙사법을 이용하였다. 수중낙사법은 수중에서 퇴적된 자연 상태의 흙 구조를 가장 잘 나타낼 수 있는 시료 조성방법으로 균등한 시료의 조성 과 더불어 시료의 포화가 확실하게 되는 장점이 있다(Vaid et al., 1999; Lee et al., 2008). 또한 모든 지반은 일관된 실험 결과를 얻기 위해 4번 체(4.75mm)로 걸러 자갈, 조개 등과 같은 불순 물을 제거하였다.

여기서, D_{50} 은 각각 입도분포곡선에서 50% 통과시 입자의 크기를 나타내며, C_u 는 균등계수(uniformity coefficient), C_c 는 곡률계수(coefficient of curvature)를 나타낸다.

2.2 침하 저감용 보강재

본 연구에서는 각 보강재에 따른 침하 및 세굴 저감 특성을 알아보기 위해 Fig. 2와 같이 3종류의 보강재(지오그리드, 지오그리드-대나무매트 및 해초-지지봉 매트)와 대조군인 무보강 인공어초를 사용하였다. 실험에 사용된 인공어초 모형은 사각형 어초로서, 모델의 제원은 50mm×50mm×50mm, 두께 6.25mm의 정육면체 형태이며, 1개당 무게는 약 6.3g이다. 한국수산자원관리공단(Korea fisheries

resources agency)에서 조사한 2017년 인공어초 통계자료 기준에 의하면 사각형 어초(규격 : 2m×2m×2m, 중량 : 3.4t)는 우리나라 전체 시설량의 약 63.1%를 차지한다.

실험에 적용한 보강재 크기는 상사법칙(law of similarity)을 고려하여 Table 2에 나타난 바와 같이 1:40으로 크기를 축소하여 실험을 수행하였다. 각 보강재의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 지오그리드는 보강토 공사나 옹벽 시공시 사용되는 토목 재료로서 인장강도는 6t/m, mesh의 크기는 6mm×6mm이다(Fig. 2(b)). 지오그리드-대나무 매트(geogrid-bamboo mat, GBM)는 지오그리드에 강성이 크고 인장과 비틀림 저항이 강한 대나무 매트(bamboo mat)를 보강한 것으로서, 지반에 대나무 매트를 깔고 상부에 지오그리드를 결합한 형태로 제작하였다(Fig. 2(c)). GBM 보강재의 대나무 매트(bamboo mat)의 mesh 크기는 지반에 충분한 지지력을 유지하면서 실제 현장에 적용시 상부에 설치되는 지오그리드와 결합이 수월하도록 지오그리드 mesh 크기의 2배인 12mm×12mm로 하였다. 해초-지지봉 매트(seaweed-pile mat, SPM)는 접지력 증가를 위한 하부 지지봉(pile)과 흐름 억제를 위한 상부 인조해초(artificial seaweed)가 결합된 형태이다. 길이 10mm의 하부 파일(pile)을 지오그리드 mesh 2칸 간격으로 설치하고 상부에는 길이 5mm의 인조해초(seaweed)를 부착한 형태이다. SPM 보강재의 상부 인조해초(seaweed)는 실제 해초의 높이를 고려하여 5mm로 하였으며, 하부 지지봉(pile)은 해저 연약 지반에 관입하기 위하여 10mm의 높이로 제작하였다. 또한 모든 보강재의 보강 면적은 인공어초 하부 면적 대비 약 3배(약 3.5m×3.5m)를 기준으로 한다. 따라서 실내 실험에서는 약 85mm×85mm의 정사각 형태로 보강재를 제작하여 인공어초와 접하는 해저면을 보강하였다. 지오그리드 mesh 크기는 6mm×6mm로서 사각형 인공어초의 바닥 보(beam)의 폭 6.25mm보다 좁게 하여 인공어초를 설치시 바닥 부분이 지오그리드에 접지할 수 있도록 하였다.

Table 2. Law of similarity of reinforcement

Law of similarity		Mesh size		Reinforced area	
		Real size (m)	Experiment (mm)	Real size (m)	Experiment (mm)
1:40	Geogrid	0.24×0.24	6×6	3.5×3.5	85×85
	Bamboo mat	0.48×0.48	12×12		
	Pile	0.4	10		
	Seaweed	0.2	5		

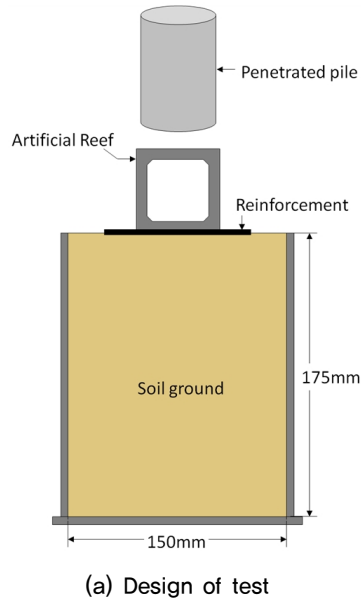


Fig. 3. Bearing capacity test

2.3 실내 실험

인공어초의 침하 및 세굴 저감 특성을 알아보기 위해 지지력 시험(bearing capacity test), 대형 수조 침하 실험 (large size settlement test) 및 2차원 흐름 수조 세굴 실험 (two-dimensional flow scour test)을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 지지력 실험은 CBR 실험 장비를 변형한 것으로 원형 관입봉이 아닌 사각형 어초 모형을 관입하였으며, 지반의 상부에 보강재를 포설하고 인공어초 모형을 설치하여 지지력 실험을 수행하였다. 이 때 관입 속도는 1mm/min으로 하였다. 사용된 공시체의 크기는 높이 175mm, 내부 직경 150mm이며, 인공어초 높이의 25%인 약 12.5mm 관입시 최대 지지력 값을 이용하였다(Fig. 3). 본 연구의 경우 인공어초 보강에 따른 지지력 특성에 대한 경향을 보고자 하였으며, 실내 실험의 제한 등에 따라 물드의 경계 조건에 대한 영향은 고려하지 않았다.

Fig. 4는 대형 수조 침하 실험의 제원을 나타낸다. 폭

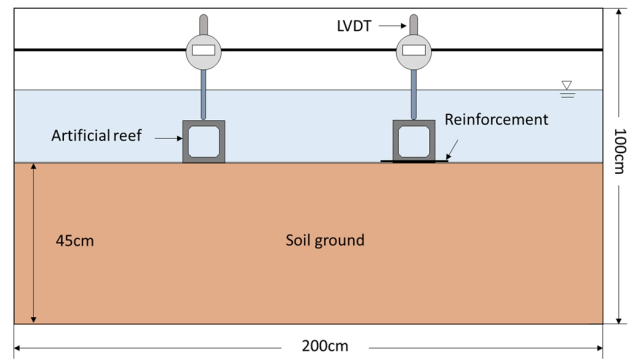


Fig. 4. The large size settlement test

50cm, 높이 100cm, 길이 200cm의 대형 침하 수조를 이용하여 압밀 침하 실험을 수행하였으며, 이 때 약 45cm까지 지반을 균등하게 조성한 후 상부에 변위 측정 자기 센서(LVDT)를 설치하여 실시간으로 침하량을 측정하였다.

2차원 흐름 수조 세굴 실험 장비는 Fig. 5와 같이 총 연장 1,100cm, 폭 30cm, 높이 60cm의 2차원 흐름 수조에

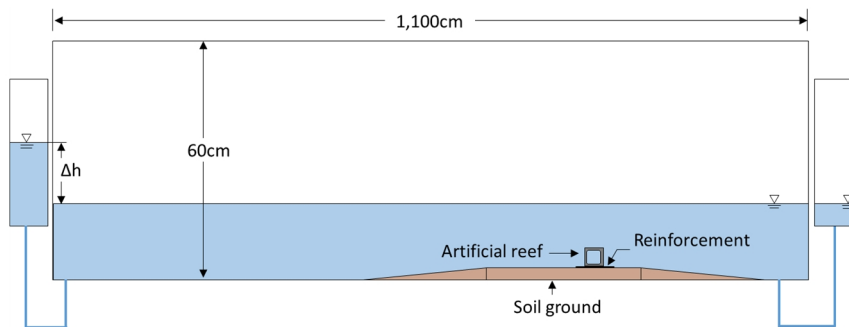


Fig. 5. Two-dimensional flow scour test

Table 3. Experimental conditions for the flow test

	Design condition		Artificial reef		Law of similarity
	Velocity	Depth	Size	Thickness	
Real sea	1 m/sec	8 m	2 m×2 m×2 m	25 cm	1:40
Experiment	15 cm/sec	20 cm	5 cm×5 cm×5 cm	6.25 cm	

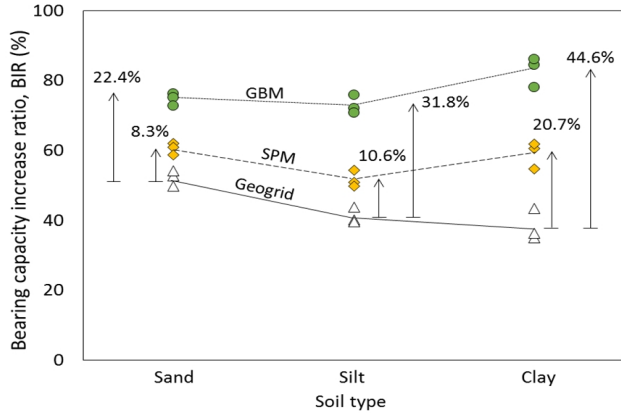


Fig. 6. BIR distribution according to reinforced types and soil types

수위조절용 장치를 연결한 것으로 동수경사에 의한 일정한 유속 조건을 적용하여 세굴 실험을 수행하였다. 각 실험 케이스마다 흐름 지속 시간은 30분으로 하였으며, 발생한 세굴의 분포 및 깊이는 1mm 단위로 측정 가능한 자(ruler)를 이용하여 측정하였다. 수리학적 조건은 Froude 상사 법칙에 의거하여 적용하였다(Table 3).

3. 실험 결과

3.1 지지력 시험 결과

각 지반 조건(모래, 실트, 점토)에서 보강재의 보강에 따른 지지력 실험을 수행하였다. 실험 결과를 이용하여 각 지반의 지지력 증가 효과를 정량적으로 평가하기 위해 지지력 증가비(bearing capacity increase ratio, BIR)를 산정하였다. 이때 BIR은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$BIR(\%) = \frac{q_{(R)} - q_{(UR)}}{q_{(UR)}} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, $q_{(UR)}$ 은 무보강 지반의 지지력(bearing capacity of unreinforced soft ground), $q_{(R)}$ 은 보강재로 보강된 지반의 지지력(bearing capacity of reinforced soft ground)이다.

Fig. 6은 각각의 지반 조건에서 3종류의 보강재에 따른

BIR 값과 지오그리드 보강 대비 GBM 및 SPM 보강재의 BIR 증가량을 나타낸다. 먼저 지반 조건에 따른 BIR 값을 살펴보면 모래 지반의 경우 약 49.8%~76.2%의 범위를 가졌으며, 실트 지반에서 39.5%~75.9%, 점토 지반에서 35.0%~86.1%의 범위로 나타났다. 각 보강재에 따른 BIR 값을 살펴보면 지오그리드 보강의 경우 모래, 실트 및 점토 지반에서 각각 평균 52.2%, 41.1% 및 38.2%로 나타났다. 또한, GBM 보강의 경우 각각 74.7%, 72.9% 및 82.8%로 나타났으며, SPM 보강의 경우 각각 60.6%, 51.7% 및 58.9%로 나타났다. 지오그리드 보강의 경우 모래지반에서 지지력 증대 효과가 가장 크게 나타났으며, 점토지반에서 지지력 증대 효과가 가장 작게 나타났다. 일반적으로 보강재가 보강된 지반에 하중이 작용할 경우 지반과 보강재 사이의 마찰 저항(frictional resistance)가 발생하여 지반의 지지력이 증가하게 되는데 실트 및 점토 지반의 경우 모래에 비해 상대적으로 입자가 매우 작아 맞물림이나 마찰 저항이 충분히 발생되지 않는다(Abdi et al., 2009). 이러한 이유로 인해 모래 지반 보강의 경우 더 큰 지지력이 나타난 것으로 보인다.

또한 각 지반 조건에서 지오그리드 보강 대비 GBM 및 SPM 보강에 따른 BIR 증가량을 살펴보면, GBM 보강시 모래, 실트 및 점토 지반에서 각각 22.4%, 31.8% 및 44.6% 가량 BIR 값이 증가되었으며, SPM 보강시 각각 8.3%, 10.6% 및 22.7% 가량 크게 나타났다. GBM 및 SPM 보강에 따른 보강 효과는 점토 지반에서 그 효과가 가장 크게 나타났으며, 이는 지오그리드에 결합되는 대나무 매트 또는 하부 지지봉에 의해 지반의 지지력과 지반 입자와의 마찰 저항이 상대적으로 증가하여 연약한 점토 지반에서 지지력이 크게 증가하게 된 것으로 판단된다.

3.2 대형 수조 침하 실험 결과

Fig. 7은 각 지반 조건별 대형 수조 침하 실험 결과를 나타낸다. 침하 측정 시간은 압밀침하를 고려하여 24시간 동안 측정하였다. 이때 모래 지반의 경우 하중이 작용함과 동시에 발생하는 즉시침하가 주를 이루어 초기 발생 이후

침하량이 크게 변하지 않았기 때문에 6시간 이후에 침하 관측을 종료하였다(Fig. 7(a)). 각 지반 조건에서 무보강된 인공어초의 최종 침하량을 살펴보면 모래 지반의 경우 약 0.27mm의 즉시침하를 보였으며, 실트 지반에서 약 1.7mm, 점토 지반에서 약 7.0mm의 압밀침하를 보였다. 그러나 보강재 보강에 따라 지반 침하량은 저감되는 경향을 보였으며, 특히 GBM 보강과 SPM 보강된 지반에서는 무보강에 비해 침하량이 크게 저감되었다.

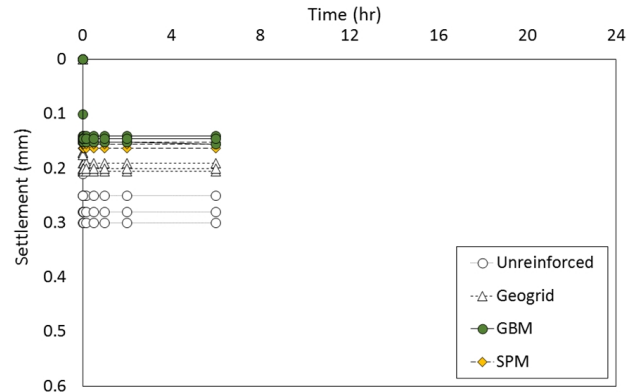
각 지반 조건에서 보강재 종류에 따른 침하 저감 효과를 분석하기 위해 침하 저감비(Settlement reduction ratio, SRR)를 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$SRR(\%) = \frac{S_{(UR)} - S_{(R)}}{S_{(UR)}} \times 100(\%) \quad (2)$$

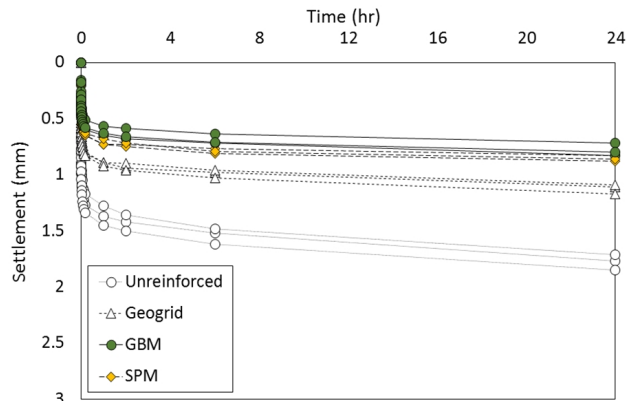
여기서, $S_{(UR)}$ 은 무보강된 지반의 침하량(Settlement of unreinforced soft ground), $S_{(R)}$ 은 토목용 보강재가 보강된 지반의 침하량(Settlement of reinforced soft ground)을 나타낸다.

Fig. 8은 보강재의 종류에 따른 각 지반의 SRR 값을 나타낸다. 보강재에 따른 SRR 값을 살펴보면 지오그리드의 경우 지반 조건에 관계없이 약 35% 내외의 유사한 값을 나타내었으나, GBM 보강 및 SPM 보강의 경우 점토 지반에서 SRR 값이 각각 약 60% 및 55%로 침하 저감 특성이 가장 크게 나타나는 경향을 보였다. 또한 지오그리드 보강 대비 SRR 값의 차이를 비교해 보면 GBM 및 SPM 보강에 따라 모래 지반에서 각각 17.2%와 13.9%의 증진을 보였으며, 실트 지반의 경우 각각 19.1%와 15.0%의 증진을, 점토 지반에서 각각 25.3%와 19.4%로 점토 지반에서 그 값의 차이가 가장 크게 나타났다. 이는 앞서 수행한 지지력 실험과 유사한 결과이며, 특히 점토 지반과 같은 연약 지반을 보강할 경우 지지력 증대 및 침하 저감 효과가 더 크게 나타나는 경향을 보였다.

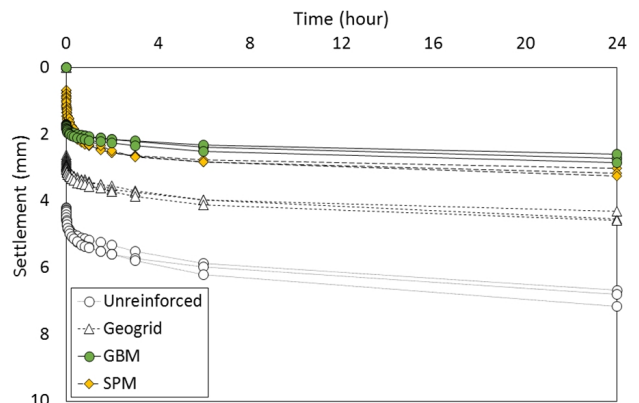
지지력 실험 및 침하 실험을 통해 구한 BIR 값과 SRR 값의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 보강 조건과 지반 조건에 따라 BIR 및 SRR 값의 범위는 차이 있지만 전반적으로 SRR이 BIR의 약 0.55배~1.05배의 값을 가지는 것으로 나타났다. 해지면 보강 효과는 지지력 증가비(BIR) 또는 침하저감비(SRR)가 클수록 커진다고 할 수 있다. 따라서 GBM 보강이 지오그리드 및 SPM 보강에 비해 보강 효과가 우수하다고 할 수 있다.



(a) Sand ground



(b) Silt ground



(c) Clay ground

Fig. 7. Settlement behavior according to soil types

Fig. 10은 각 지반 조건에 따른 지지력(bearing capacity)과 인공어초 폭으로 정규화한 침하량(settlement / length of AR)의 관계를 나타낸다. 각 지반에 따라 지지력과 침하량의 관계는 선형적으로 반비례하는 경향을 보였다. 특히 점토 지반에서 낮은 지지력 값의 범위와 큰 침하량 발생으로 기울기가 가장 크게 나타났으며, 모래 지반의 경우 기울기가 가장 완만하게 나타났다.

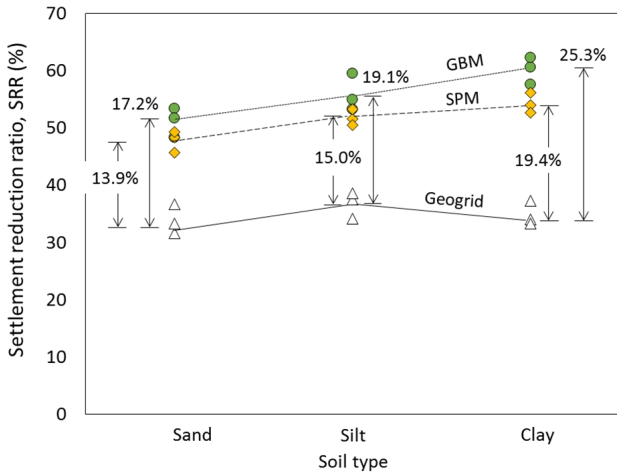


Fig. 8. SRR distribution according to reinforced types

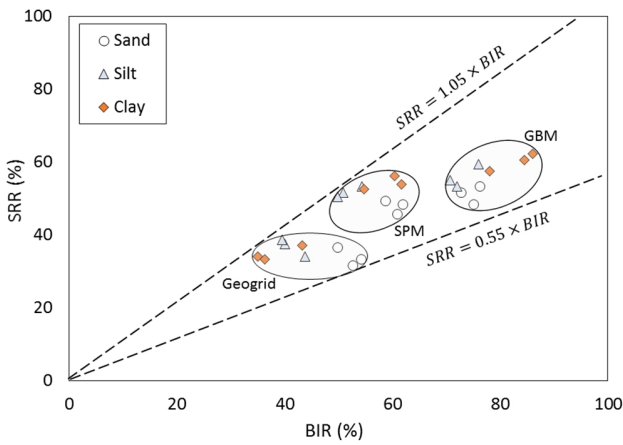


Fig. 9. Relationship between BIR and SRR

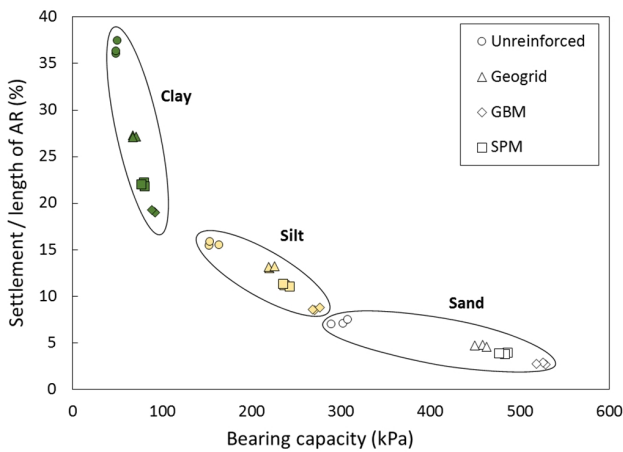
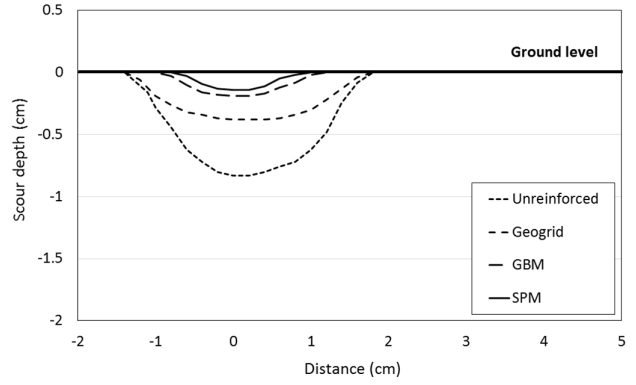


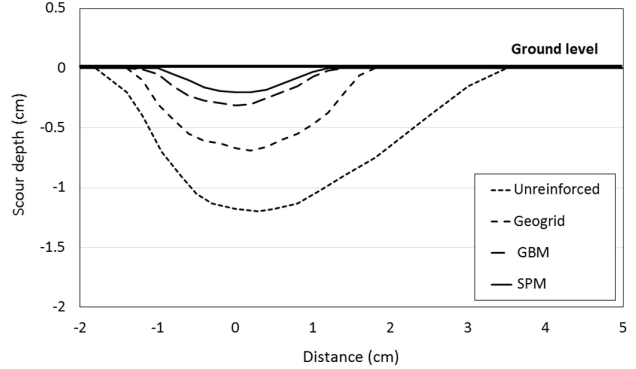
Fig. 10. Relationship between bearing capacity and settlement / length of AR

3.3 2차원 흐름 수조 세굴 실험 결과

Fig. 11은 2차원 흐름 수조 세굴 실험 결과를 나타낸다. 여기서 인공어초의 전면부 위치를 기준으로 거리(cm)를



(a) Sand ground



(b) Silt ground

Fig. 11. Scour depth according to soil types

표기하였으며, 세굴 경향을 뚜렷하게 볼 수 있는 모래 및 실트 지반에서 실험을 수행하였다. 일반적인 세굴 형태는 물의 흐름에 저항하는 인공어초에 의해 반원형 형태로 나타났으며, 모래 지반과 비교해서 실트 지반에서 더 큰 세굴 깊이를 나타내었다. Roberts et al.(1998), Briaud et al.(1999), Briaud et al.(2001)은 해저 지반과 세굴과의 관계에 대해 지반 입자가 작을수록 세굴이 더 크게 발생한다고 실험적으로 밝힌 바 있으며, 본 연구 결과도 이와 유사한 경향을 보였다. 또한 해저면을 보강할수록 세굴은 크게 감소함을 알 수 있으며, 특히 해초매트가 결합된 SPM에서 가장 작은 세굴이 발생하였다.

세굴 저감량에 대한 상대적인 비교를 위해 식 (3)을 이용하여 세굴깊이비(scour depth ratio, SDR)를 계산하였다.

$$SDR(\%) = \frac{H_{SD}}{H_{AR}} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서, H_{AR} 은 인공어초 모형의 높이를 나타내며, H_{SD} 는 각 보강재 조건에 따른 최대 세굴 깊이를 나타낸다.

Fig. 12는 각 보강재에 따른 SDR 값을 나타낸다. 모래 지반의 SDR 값은 무보강 조건에서 약 16%으로 나타났으

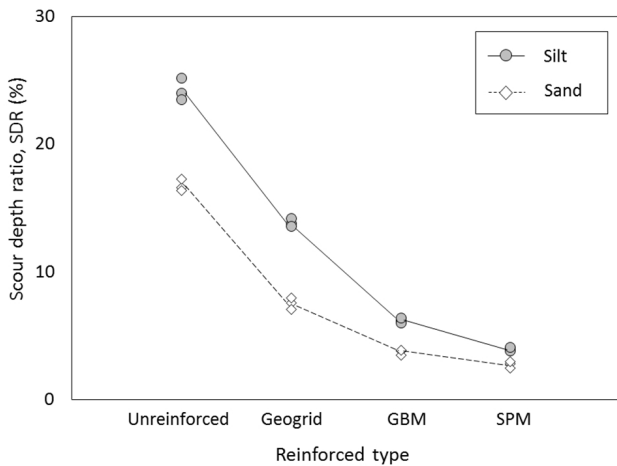


Fig. 12. SDR distribution according to reinforced types

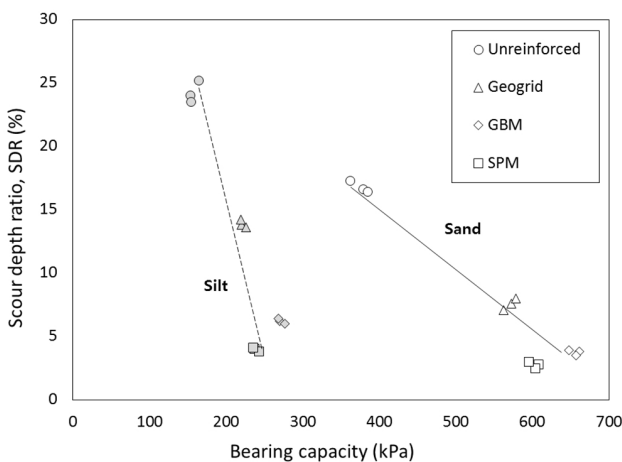


Fig. 13. Relationship between bearing capacity and SDR

며, 실트 지반의 경우 약 24%의 값을 보였다. 특히 실트 지반의 경우 세굴량이 크게 나타나 인공어초의 전면부가 기울어지는 현상을 보였다. 그러나 보강재로 해저지반을 보강할 경우 SDR 값은 크게 감소하였으며, 지오그리드, GBM 및 SPM 순서로 세굴 저감 효과가 증가하였다. 두 지반 모두 GBM 및 SPM 보강시 5% 내외의 아주 작은 SDR 값을 보여 세굴 저감 효과가 크게 나타나는 경향을 보였다. Fig. 13은 모래 및 실트 지반에서 지지력과 SDR 값과의 관계를 나타낸다. SDR 값은 지지력이 증가할수록 선형적으로 감소하는 경향을 보이며, 이는 앞서 Fig. 10의 결과와 유사하다. 또한 모래 지반에 비해 상대적으로 연약한 실트 지반에서 지지력 증가에 따른 SDR 값의 감소폭이 더 크게 나타났다.

본 연구의 결과는 실내 실험 특성상 실험적 한계가 있어 모형의 크기를 1:40으로 축소하여 실험하였으나, 지반 입자의 scale 축소는 실질적으로 제한이 있으므로 결과를 일

반화하기에는 한계가 있다. 따라서 추후 다양한 실험 및 현장 적용을 통해 이러한 결과를 검증할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인공어초의 침하 및 세굴을 저감하기 위한 방안으로 다양한 보강재를 적용하였으며, 그에 따른 침하 및 세굴 저감 특성을 알아보았다. 사용된 보강재는 지오그리드, GBM, SPM 총 3종류의 보강재를 이용하였으며, 지지력 실험, 대형 수조 침하 실험, 2차원 흐름 수조 세굴 실험을 통해 구한 각각의 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 보강재에 따른 보강 효과는 지오그리드 보강시 가장 낮게 나타났으며, GBM 보강시 지지력 증대 효과가 가장 크게 나타났다. 또한 각각 지반 조건에서 지오그리드 보강 대비 GBM 및 SPM 보강에 따른 지지력 증가비(BIR) 증가량을 살펴보면, GBM 보강시 모래, 실트 및 점토 지반에서 각각 22.4%, 31.8% 및 44.6% 가량 BIR 값이 크게 나타났으며, SPM 보강시 각각 8.3%, 10.6% 및 22.7% 가량 높게 나타났다. GBM 및 SPM 보강에 따른 보강 효과는 점토 지반에서 그 효과가 가장 크게 나타났다.
- (2) 대형 수조 침하 실험 결과 지반에 따른 침하량은 각 보강재의 보강에 따라 크게 저감되는 경향을 보였다. 보강재에 따른 침하 저감비(SRR) 값을 비교해 본 결과, 지오그리드 보강시에는 지반 조건에 관계없이 유사한 값의 범위를 가졌으나, GBM 및 SPM 보강의 경우 그 값이 크게 증진되었다. 또한 BIR 값과 SRR 값의 관계를 비교한 결과 전반적으로 $SRR=(0.55 \sim 1.05)$ BIR의 범위를 가지는 것으로 나타났다.
- (3) 2차원 흐름 수조 세굴 실험을 통해 산정한 세굴 깊이 비(SDR)를 살펴보면 무보강 조건에서는 모래 지반과 실트 지반에서 각각 약 16%, 24% 가량 나타났다. GBM 및 SPM의 보강에 따라 세굴 깊이가 점차 감소하는 경향을 보였으며, 특히 GBM 및 SPM 보강시 SDR 값이 약 5% 이내로서 세굴이 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 해저 지반의 지지력이 증가할수록 인공어초 침하량은 선형적으로 감소하며, 세굴 깊이도 감소한다는 것을 알 수 있다.

Acknowledgement

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University (2017 year).

References

1. ASTM (1985), D 2487-83, Classification of Soils for Engineering Purposes, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.04, pp.395-408.
2. Briaud, J. L., Ting F., Chen, H. C., Gudavalli, G. and Perugu, S. (1999), SRICOS : Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, Vol.125, No.4, pp.237-246.
3. Briaud, J. L., Ting, F., Chen, H. C., Cao, Y., Han, S. W. and Kwak, K. S., (2001), Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.2. pp. 105-113.
4. Carr, M. H. and Hixon, M. A. (1997), Artificial reefs, The Importance of Comparisons with Natural Reefs, *Fisheries*, Vol.22, No.4, pp.28-33.
5. Je J. G., Lee, H. G. and Shin, S. H. (2003), Underwater Observation on Artificial Reefs in the Coastal Water of Gyeonggi-do, Korea, *Journal of Underwater Science & Technology*, Vol.4, No.1, pp.9-26.
6. Jo, Y. C., Kim, W. K., Lee, C. S. and Kim, N. I. (2010), Investigation of Dice Artificial Reef Stability Installed (1981-2004 years) on Pohang Coast of the East Sea, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.34, No.1, pp.177-182.
7. Kim H. S., Lee, J. W., Kim, J. R. and Yoon, H. S. (2009a), Estimation of Countermeasures and Efficient Use of Volume of Artificial Reefs Deployed in Fishing Grounds, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol.12, No.3, pp.181-187.
8. Kim H. S., Lee, J. W., Won, S. H., Kim, J. R. and Yoon, H. S. (2009b), Estimation of Efficient Use of Volume and Facility Volume Distribution of Artificial Reefs deployed in the busan Sea Region, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol.12, No.4, pp.255-263.
9. Kim, D. K., Kim, W. K., Son, Y. S., Yoon, J. T., Gong, Y. G., Kim, Y. D. and Lee, J. H. (2008), Settlement Characteristics of Three Type of Artificial Reefs on Sandy Bottom in the Eastern Coast of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.32, No.2, pp.359-364.
10. Kim, D. K., Lee, J. Y., Suh, S. H., Kim, C. G., Cho, J. K. and Cha, B. Y. (2009), Scouring and Accumulation by Tidal Currents Around Cubic Artificial Reefs Installed at Gegeom Waterway, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.33, No.8, pp.1275-1280.
11. Kim, W. K., Lee, J. H., Kim, D. K., Jo, Q. T., Gong, Y. G. and Ahn, J. M. (2008), Stability of Artificial Reefs Installed in Gangwon Coastal Waters of the East Sea(Sea of Japan), *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.32, No.1, pp.200-205.
12. Kim, Y. K. (2011), Scour Characteristics Around Artificial Reefs using the CFD and Field Monitoring, Chonnam National University, Master's thesis, pp. 1-67.
13. Lee, D. J. (2013), Monitoring of Fish Aggregations Responding to Artificial Reefs Using a Split-beam Echo Sounder, Side-scan Sonar, and an Underwater CCTV Camera System at Syeong Man, Busan, Korea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.46, No.3, pp.266-272.
14. Lee, J. H., Kim, W. K., Ahn, J. M. and Lee, C. S. (2010), Investigation of Conservation State of Two Types Artificial Reef on Physical Factors, Immersed in Gang won Coastal Waters of the East Sea, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.34, No.1, pp.168-176.
15. Lee, M. J., Choi, S. K., Choo, H. W., Cho, Y. S. and Lee, W. J. (2008), Uniformity of Large Gypsum-cemented Specimens Fabricated by Air Pluviation Method, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.1, pp.91-99.
16. Oh, S. J. (2009), Acoustical Investigations on the Distribution Characteristics of Fish School at the Artificial Reefs Area of Suyeong Man; Busan, Pukyong National University, Master's thesis, pp.1-22.
17. Park, J. S., Seo, M. S. and Kim, J. H. (2001), A Study on the Research Condition and Efficiency of Artificial Reefs of Rokdo Sea Region of Chungnam Province, *The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 13, No.1, pp.87-98.
18. Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D. and Lick, W. (1998), Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.124, No.12, pp.1261-1267.
19. Vaid, Y. P., Sivathayalan, D. S. and Stedman, D. (1999), Influence of Specimen Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand, *Journal of Geotechnical Testing*, Vol.22, No.3, pp. 187-195.