

## 실내실험을 통한 수중 매립토의 다짐효과 분석

### Experimental Study on Compaction Effect of Hydraulic Fill Soils

이행우<sup>1)</sup>, Haeng-Woo Lee, 장병욱<sup>2)</sup>, Pyoung-Wuck Chang, 장웅희<sup>3)</sup>, Woong-Hee Chang, 봉태호<sup>4)</sup>, Tae-Ho Bong,

- 1) 농림부 농촌진흥과 사무관, Deputy Director, Regional Development & Rural Tourism Div., Ministry of Agriculture & Forestry
- 2) 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Landscape Architecture & Rural System Engineering, Seoul National University.
- 3) 한국농촌공사 농어촌연구원 연구원, Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community & Agriculture Corporation.
- 4) 서울대학교 조경·지역시스템공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Landscape Architecture & Rural System Engineering, Seoul National University.

**SYNOPSIS :** A series of laboratory tests was carried out for analyzing compaction characteristics of hydraulic fill soils(or hydraulically filled soils). Hydraulic fill soils were settled down by the weight of soil particle itself in water and consolidated by the extraction of water from the soil structures. Water content and dry unit weight were observed as the depth of sedimentation and consolidation soil. It was found from the result that the optimum water content ( $w_{opt}$ ) of the maximum unit weight( $\gamma_{dmax}$ ) is higher than that of laboratory compaction test(KS F 2312 A method). It was due to difference in compaction energy and compaction effect between two methods. And the maximum dry unit of hydraulic fill soil is smaller than that of laboratory compaction test. Especially in terms of compaction effect, the maximum relative compaction degrees( $R_{cmax}$ ) of Seamangum dredged sand, river sand and mixed sand, half and half of dredged and river sands, were 85%, 91% and 86%, respectively. It means that the compaction effect can be 85~91% of the maximum unit weight in laboratory compaction test.

**Key words :** Hydraulic fill soil, Water content, Dry unit weight, Relative compaction, Compaction effect

## 1. 서론

우리나라는 국토가 협소하고 삼면이 바다로 둘러싸인 지형적인 여건으로 간척 및 공유수면 매립사업을 통하여 국토를 확장시켜왔다. 특히 우리나라의 간척사업은 고려조 및 조선조와 일제시대를 지나면서 군량미 확보와 미곡증산을 목적으로, 해방후에는 기근 해결을 위한 식량증산 목적으로 추진되어 오다가 1970년대 이후에는 대단위 농업개발사업으로 간척지는 물론 배후지까지를 포함한 대규모 간척사업이 정부와 민간 기업이 참여하여 실시되어 왔다(농어촌진흥공사, 1995). 아울러 최근에는 협소한 국토를 효율적으로 이용하기 위해서 인천 송도신도시 및 평택항등에서 공유수면 매립사업이 활발히 진행되고 있다. 이들 공유수면을 매립하기 위해서는 많은 매립재료가 필요한데 1차적으로 인근바다의 모래를 준설하여 활용하고 있다. 공유수면 매립이외에도 방조제 축조에도 바다에서 준설한 모래를 사용하는데 일

레로 영산강 하구인 및 새만금 방조제 등이다. 준설매립 및 성토공법은 바다수면하의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 섞인 상태로 배송관을 통해 매립지 및 성토지역으로 이송하여 매립 및 성토하는 방법이다. 물과 함께 배송관을 통해 이송된 토립자는 수중에서 침강시키고 물은 배수로를 통해 배제시켜 흙의 포화도 및 함수비를 낮춰 자중압밀과 동시에 단위중량을 증가시킨다(장흥군, 2005 ; Herbich, 1992). 준설매립의 메커니즘은 수중에서 흙 입자의 자중에 의한 침강 후 배수에 의한 단위중량을 증가시키는 것이다. 백령도 사곶해수욕장의 모래사장도 수중에서 흙 입자의 침강 후 바닷물이 빠지고 함수비가 낮아지면 백사장에 덩프 차량이 왕래하고 군용비행기의 이착륙이 가능할 정도의 지지력을 보이기도 한다(박상산 등, 2005). 하지만 준설 매립토는 초기에 함수비가 대단히 높고 지하수위가 높아 배수가 원활하지 않아 필요로 하는 강도를 갖기까지는 장시간이 소요된다. 이와 같이 함수비가 높은 준설 매립토는 장비의 진입 및 이동이 곤란해 준설매립지반에 구조물을 올려놓기 위해서는 소요의 강도를 가져야한다(장흥군, 2005). 본 연구는 수중에서 흙 입자의 자중 침강한 매립토의 함수비 변화에 의한 건조단위중량의 변화를 파악하므로써 수중 매립토의 다짐 효율을 파악하기 위함이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 재료

#### 2.1.1 물리적 특성

실내 모형실험에 사용된 재료는 새만금 준설해사(DS)와 입도가 균일한 강모래(RS), 준설사와 강모래를 1:1로 혼합한 혼합토(MS)를 사용하였다. 재료의 물리적 특성 실험결과 새만금 준설사는 실트분이 함유된 균등한 입도를 가진 세립질 모래로서, 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 분류되었다. 강모래는 입도가 균일한 모래로 통일분류법상 입도가 불량한 모래(SP)이다. 준설사와 강모래 혼합토는 준설사와 비슷한 물리적 특성을 갖으며 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 분류되었다. 그림 1과 표 1은 사용한 재료의 물리적 특성 및 입도분포곡선이다(이행우, 2005).

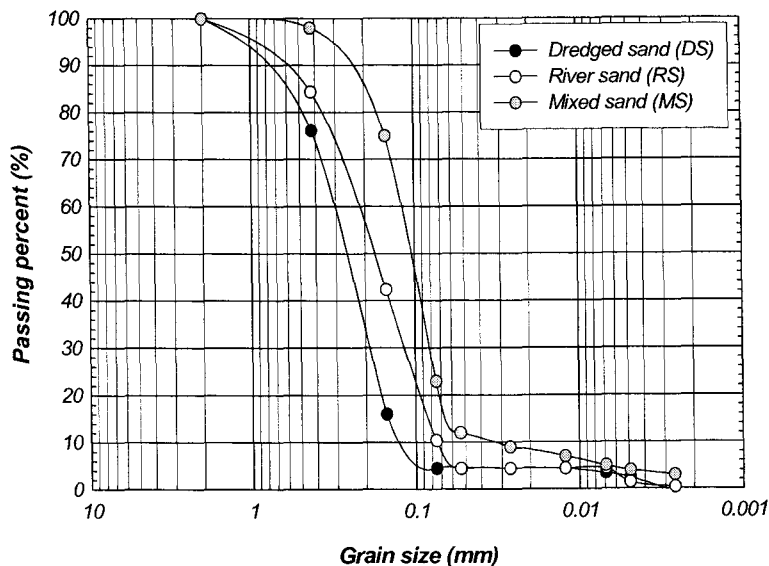


그림 1. 사용재료의 입도분포곡선

표 1. 사용재료의 공학적 특성

Materials	Physical properties		Values		
			DS	RS	MS
Sandy Soil	Uniformity coefficient ( $C_u$ )		2.6	1.5	2.9
	Curvature coefficient ( $C_c$ )		1.5	0.8	7.9
	Atterberg limits (%)	Liquidity limit (LL)	NP	NP	NP
		Plasticity index (PI)	NP	NP	NP
	Specific gravity ( $G_s$ )		2.67	2.64	2.72
	U.S.C.S		SM	SP	SM
	Compaction test (by KS F 2312 A)	$\gamma_{dmax}$ ( $kN/m^3$ )	15.19	16.66	16.17
		O. M. C (%)	13.8	13.0	14.2
Permeability, $k$ (average, $\alpha \times 10^{-5} m/s$ )		5.0	30.0	7.5	

※ DS : Dredged Sand, RS : River Sand, MS : Mixed Sand with DS and RS as 1 : 1

### 2.1.2 역학적 특성

본 모형실험에 사용한 성토재료에 대하여 KS F 2312의 A 다짐을 실시한 결과, 그림 2에 나타낸 바와 같이 새만금 준설사는 최적함수비 13.8%에서 최대건조밀도 15.19KN/m<sup>3</sup>, 강 모래는 13.0%에서 16.66KN/m<sup>3</sup>, 혼합토는 14.2%에서 16.17KN/m<sup>3</sup>로 나타났다(이행우, 2005).

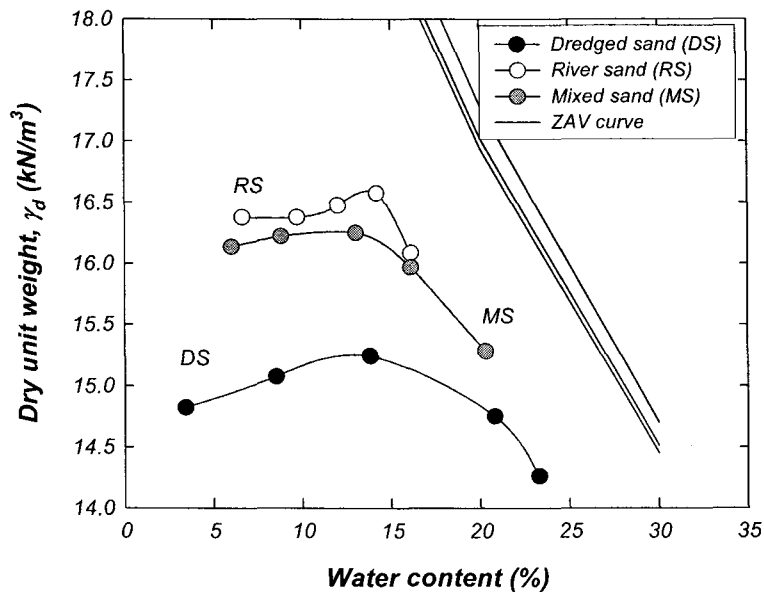


그림 2. 사용재료의 다짐곡선(KS F 2312 A)

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 수조제작

세 가지 재료에 대하여 수중에서 성토된 모래질 흙의 다짐특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같이 수조를 제작하였다. 수조는 나비 1.90m, 높이 1.0m, 폭 0.34m 이다. 수조의 재질은 스테인리스 스틸로 골격을 세우고 벽체는 아크릴 판으로 붙였다. 또한 배수밸브를 바닥으로부터 우측에 0.40, 0.60, 0.80m, 좌측에 0.25m 높이와 수조 바닥에 1개를 설치하였다.

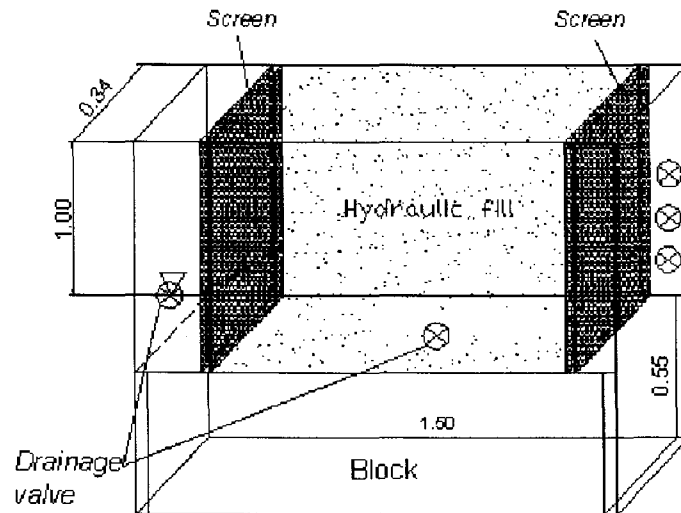


그림 3. 실험수조

### 2.2.2 실험방법

그림 4와 같이 수조에 물을 채우고 수조 높이의 1/3의 분량의 재료를 넣어 저을대로 저은 후 재료를 침강 시킨 후 배수밸브를 열어 배수시킨다. 이와 같은 방법을 3번 반복하여 재료를 수조에 완전히 채운 후 12시간에서 최장 65시간 까지 배수 시킨다.



그림 4. 수중에서의 단면형성

이후 재료를 수조에서 제거 시 바닥에서 0.8~0.1m 구간에서 높이별로 그림 5와 같이 현장 밀도시험을 실시하였다.

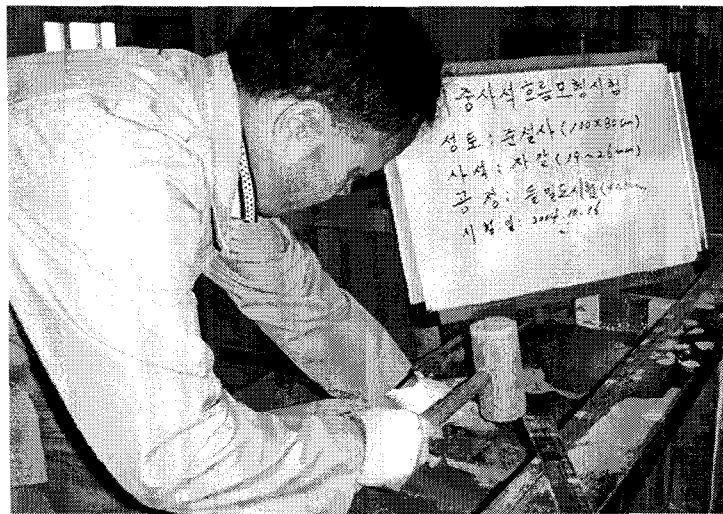


그림 5. 샘플러로 시료를 채취하는 장면

채취한 시료의 습윤중량( $W$ )과 부피( $V$ )를 구하여 전체단위중량( $\gamma_t$ )을 식 (1)에 의하여 구하고 함수비( $w$ )를 식 (2)로 측정하여 건조단위중량( $\gamma_d$ )을 식 (3)에 의하여 구했다.

$$\text{전체단위중량, } \gamma_t = \frac{W}{V} \quad (1)$$

여기서,  $W$ : 채취한 젖은 흙의 무게(g)  
 $V$ : 시료의 부피(샘플러의 부피)



그림 6. 샘플러에서 시료를 빼내는 장면

샘플러의 내직경( $D_f$ )은 6.1cm이고 높이( $H$ )는 9.54cm이다. 따라서 시료의 부피는 278.7 $\text{cm}^3$ 이다. 그림 6은 채취한 시료의 무게를 달기 위하여 샘플러에서 흙을 빼내는 장면이다.

$$\text{함수비, } w = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%) \quad (2)$$

$W_w$ : 물의 무게(젖은 흙의 무게-건조 흙의 무게, g)

$W_s$ : 건조 흙의 무게(g)

$$\text{건조단위중량, } \gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+w} \quad (3)$$

식 (3)에 의하여 건조단위중량( $\gamma_d$ )을 구한다음 식 (4)의 상대다짐도( $R_c$ )를 구하여 수중매립토의 다짐효과를 구하였다.

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \times 100(\%) \quad (4)$$

또한 실내다짐(KS F 2312 A)은 몰드 안지를 0.10m ( $V=1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$ )에 3층으로 시료를 넣고 각층에 2.5kg의 해머를 0.3m 높이에서 25회 낙하시켜 다지는 방법이다. 다짐에너지는 다짐효율로 식 (5)에 의하여 구한다(김석열 등, 2004).

$$E_c = \frac{WHN_B N_L}{V} = \frac{2.5 \text{kg} \times 9.8 \text{m/s}^2 \times 25 \text{회} \times 3 \text{층}}{1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3} = 551,250 \text{J/m}^3 \approx 251 \text{KJ/m}^3 \quad (5)$$

여기서,  $E_c$ : 다짐에너지( $\text{KJ/m}^3$ )

W: 해머의 중량(kg)

H: 해머의 낙하고(m)

NB: 1층당 타격 회수

NL: 층수

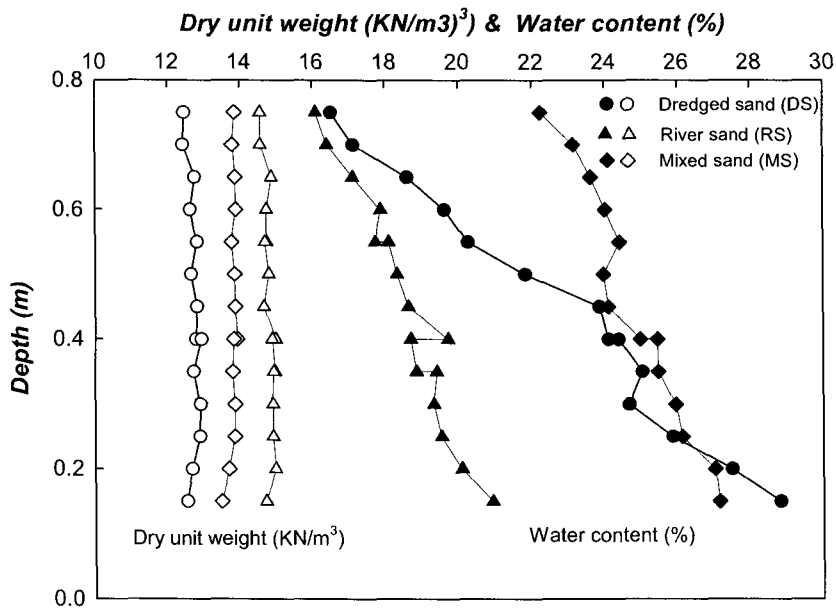


그림 7. 실험수조의 깊이별 함수비와 건조단위 중량

표 2. 함수비 및 건조단위중량 계산결과

Sand	Depth range (m)	$W_w$ (g)	$\gamma_t$ (KN/m <sup>3</sup> )	$w_w$ (g)	$w_s$ (g)	$w$ (%)	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	$R_c$ (%)	Void ratio (e)	Saturation (%)
Dredged	0.80-0.70	412.89	14.52	39.45	33.85	16.54	12.46	82	1.10	40
	0.75-0.65	413.99	14.56	56.17	47.95	17.14	12.43	82	1.11	41
	0.70-0.60	430.06	15.12	44.80	37.41	19.75	12.63	83	1.07	49
	0.65-0.55	409.30	14.39	42.15	36.45	15.64	12.45	82	1.10	38
	0.60-0.50	437.95	15.40	43.85	36.46	20.27	12.80	84	1.04	52
	0.55-0.45	444.93	15.65	56.38	46.28	21.82	12.84	85	1.04	56
	0.50-0.40	451.81	15.89	71.00	57.32	23.87	12.83	84	1.04	61
	0.45-0.35	451.19	15.87	46.80	37.71	24.11	12.78	84	1.05	61
	0.45-0.35	457.55	16.09	66.00	53.06	24.39	12.93	85	1.02	64
	0.40-0.30	452.56	15.91	61.72	49.36	25.04	12.73	84	1.06	63
	0.35-0.25	457.34	16.08	46.89	37.61	24.67	12.90	85	1.03	64
	0.30-0.20	461.53	16.23	52.54	41.74	25.87	12.89	85	1.03	67
	0.25-0.15	459.89	16.17	51.31	40.24	27.51	12.68	83	1.06	69
	0.20-0.10	459.17	16.15	54.29	42.14	28.83	12.53	83	1.09	71
River	0.80-0.70	481.10	16.92	43.46	37.43	16.11	14.57	87	0.78	55
	0.75-0.65	482.83	16.98	48.64	41.78	16.42	14.58	88	0.77	57
	0.70-0.60	495.40	17.42	51.52	43.99	17.12	14.87	89	0.74	62
	0.65-0.55	494.40	17.38	48.17	40.86	17.89	14.75	89	0.75	63
	0.60-0.50	493.56	17.36	50.85	43.19	17.74	14.74	88	0.76	63
	0.60-0.50	493.56	17.36	45.14	38.22	18.11	14.69	88	0.76	64
	0.55-0.45	498.50	17.53	55.87	47.21	18.34	14.81	89	0.75	66
	0.50-0.40	495.38	17.42	45.35	38.22	18.66	14.68	88	0.76	65
	0.45-0.35	510.53	17.95	77.92	65.08	19.73	14.99	90	0.73	73
	0.45-0.35	502.76	17.68	79.38	66.87	18.71	14.89	89	0.74	68
	0.40-0.30	506.32	17.80	43.35	36.47	18.86	14.98	90	0.73	69
	0.40-0.30	507.29	17.84	50.23	42.06	19.42	14.94	90	0.73	71
	0.35-0.25	505.81	17.79	72.09	60.41	19.33	14.90	89	0.74	70
	0.30-0.20	507.12	17.83	60.97	51.00	19.55	14.92	90	0.73	71
0.25-0.15	512.01	18.00	74.68	62.18	20.10	14.99	91	0.73	74	
0.20-0.10	506.15	17.80	80.67	66.71	20.93	14.72	88	0.76	74	
Mixed	0.80-0.70	482.15	16.95	62.54	51.16	22.24	13.87	86	0.92	64
	0.75-0.65	483.50	17.00	53.84	43.72	23.15	13.81	85	0.93	66
	0.70-0.60	487.93	17.16	67.84	54.88	23.62	13.88	86	0.92	68
	0.65-0.55	490.09	17.23	85.09	68.61	24.02	13.90	86	0.92	70
	0.60-0.50	487.43	17.14	67.83	54.52	24.41	13.78	85	0.93	70
	0.55-0.45	488.97	17.19	50.05	40.37	23.98	13.87	86	0.92	69
	0.50-0.40	490.19	17.24	63.50	51.16	24.12	13.89	86	0.92	70
	0.45-0.35	495.03	17.41	54.64	43.72	24.98	13.93	86	0.91	73
	0.45-0.35	493.66	17.36	68.85	54.88	25.46	13.84	86	0.93	73
	0.40-0.30	492.85	17.33	86.09	68.61	25.48	13.81	85	0.93	73
	0.35-0.25	496.35	17.45	69.12	54.88	25.95	13.86	86	0.92	75
	0.30-0.20	497.03	17.48	86.54	68.61	26.13	13.86	86	0.92	76
	0.25-0.15	494.94	17.40	69.72	54.88	27.04	13.70	85	0.95	76
	0.20-0.10	487.95	17.16	87.24	68.61	27.15	13.49	83	0.98	74

### 3. 결과 및 고찰

본 연구는 세 가지 재료에 대해 수중에서 자연침강 시키고 함수비가 16~28% 될 때까지 배수시킨 다음 실험수조의 상부로부터 0.8~0.10m 위치에서 함수비와 건조단위중량을 구하여 실내다짐시험(KS F 2312 A)의 최적건조밀도와 비교하여 식 (4)의 상대다짐에 의하여 수중 매립토의 다짐효과를 구하는 것이다. 표 2는 시료를 채취하여 함수비와 건조단위중량을 구하기 위하여 정리한 표이고 그림 7은 표 2에서 구한 세 가지 재료의 수조 깊이별(0.8~0.1m)로 함수비와 건조단위중량을 구하여 도시하였다.

표 2와 그림 7에서 보는바와 같이 함수비는 깊이가 증가함에 따라 증가하였으며 이는 수조의 배수구로부터 물이 배제될 때 수조의 상부에서 하부로 이동하기 때문이다. 건조단위 중량은 깊이에 따라 큰 변화는 없으나 상부에서  $3/4H(0.6m)$  이하에서는 약간 감소하는 것으로 나타났다.

그림 8~10은 세 가지 재료에 대하여 실내다짐곡선과 수중 매립토의 함수비 변화에 대하여 다짐특성을 도시하였다.

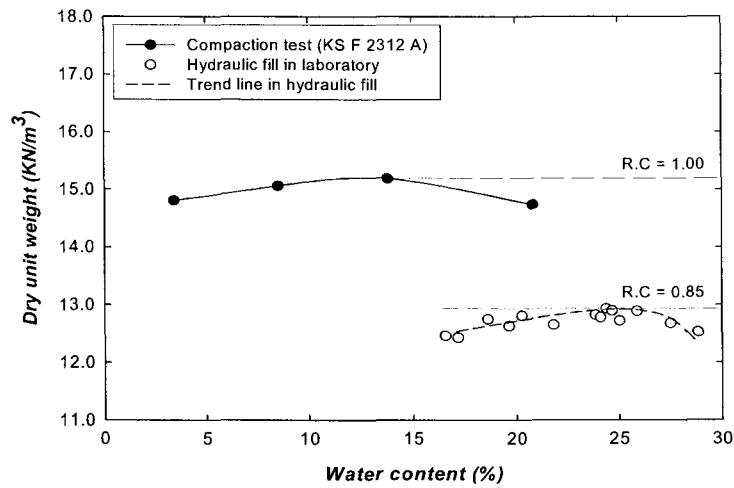


그림 8. 새만금 준설사(DS) 수중다짐 특성

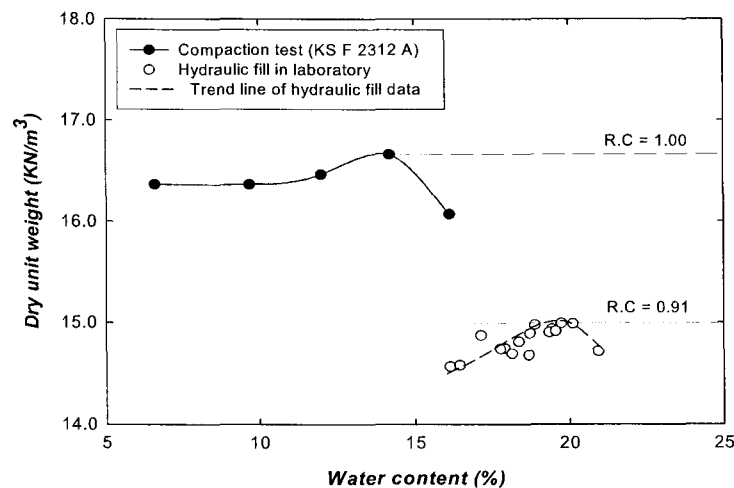


그림 9. 하상모래(RS)의 수중다짐 특성



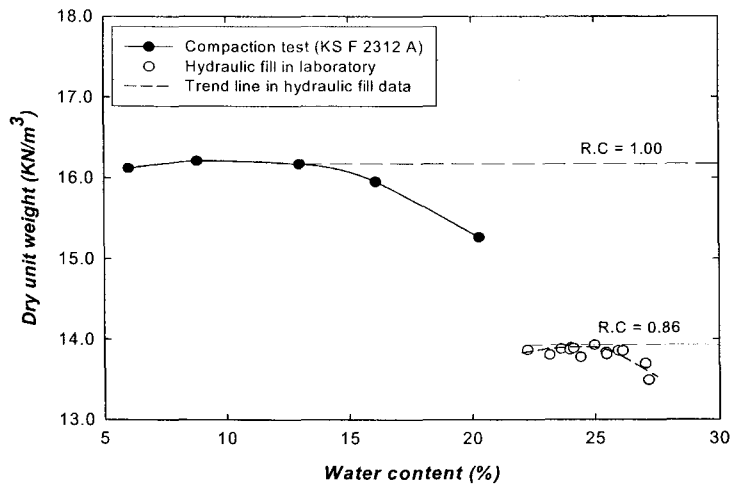


그림 10. 새만금 준설사와 하상모래의 1:1 혼합사(MS)의 수중다짐 특성

그림 8~10에서 보는 바와 같이 세 가지 재료 모두가 수중매립토의 최적 건조단위중량이 실내다짐시험의 최대건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ )의 최적함수비( $w_{cl}$ )보다 큰 함수비에서 나타났다. 실내시험(KS F 2312 A)은 약  $551 \text{ KJ/m}^3$  에너지로 강제로 다지지만 수중 매립토는 수중에서 자중침강에 의한 다짐이기 때문에 다짐에너지가 작다(Herbich, 1992). 또한 수중 매립토의 최대 건조단위중량은 실내다짐시험의 최대 건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ )보다 작았다. 표 2와 그림 8~10에서 보는바와 같이 수중매립토의 최대 상대다짐도( $R_c$ )는 새만금 준설사의 경우 85%, 하상모래의 경우 91%, 새만금 준설사와 하상모래의 1:1 혼합사는 86%이다. 이는 실트질 모래의 수중에서의 자중에 의한 다짐효과는 최대 85~91%임을 알 수 있다. 표 3은 이를 정리하여 나타냈다.

표 3. 실내다짐과 수중매립 실트질 모래의 다짐특성 비교

구 분	최적함수비 ( $w_{cl}$ , %)		최대건조단위중량 ( $\gamma_{dmax}$ , $\text{KN/m}^3$ )		최대다짐도 ( $R_{cmax}$ , %)	비고
	실내시험	수중매립	실내시험	수중매립		
준설사(DS)	13.8	24.4	15.19	12.93	85	
하상모래(RS)	13.0	20.1	16.66	14.99	91	
혼합사(MS)	14.2	26.0	16.17	13.86	86	

#### 4. 종합결론

수중 매립토의 다짐특성을 파악하기 위하여 실내수조에서 실험을 실시하였다. 실시결과 수중매립토는 실내다짐시험(KS F 2312 A)과 비교하여 최적함수비( $w_{cl}$ )는 크게 나타났다. 이는 수중매립은 수중에서 자중에 의한 침강 후 배수로 인한 함수비 변화에 의한 자연다짐이기 때문에 다짐에너지 차이로 기인한 것으로 판단된다. 최대건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ )은 수중매립이 실내다짐시험결과와 비교하여 작게 나타났다. 구체적으로 최대상대다짐도( $R_{cmax}$ )를 보면, 새만금 준설사가 85%, 하상모래가 91%, 새만금 준설사와 하상모래의 1:1 혼합사가 86%로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 김석열, 김현태, 노종구, 류기승, 정인영, 홍병만(2004), 실무자를 위한 토질공학, 반석기술, 서울, pp.23~26.
2. 농어촌진흥공사(1995), 한국의 간척
3. 박상산, 조남준(2005), “백령도 사곶해수욕장의 지지력에 관한 연구”, 한국지반공학회, 봄 학술발표회 논문집(CD) pp.1183~1190.
4. 이행우(2005), 방조제 바다사석층의 규모 및 통수성에 따른 체체 침투특성 연구, 서울대학교 박사학위논문
5. 장홍군(2005) 삼산지구 준설토 시공방법개선 및 체적변화 연구, 농업기반공사 농어촌연구원, pp.3~5.
6. 정인준, 김상규(1990), 토질역학, 동명사, 서울, pp.31~35.
7. B. M. Das(1985) *Principle of Geotechnical Engineering*, PWS Engineering, Boston, pp.488~523
8. John B. Herbich(1992), *Handbook of Dredging Engineering*, McGRAW-Hill, New York, pp.8.1~8.23
9. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, pp.532~539