

# 건조에 의한 준설 매립 지반의 물리적 특성변화

윤용한 · 김원태

건국대학교 산림과학과

## Changes in Physical Properties of Dredged Soils by Drying

Yonn, Yong-Han · Kim, Won-Tae

Dept. of Forest Science, Konkuk University

### ABSTRACT

This study was carried out to determine the ways in which drying improves and develops dredged soils which exist widely in the lowlands of Korea. Before drying there were large variations in the fundamental physico-chemical properties of dredged soils collected from different places. In the sample soils, saturated hydraulic conductivity decreased gradually with an increase in bulk density with the exception that in air-dried soils a reverse trend was observed. Also in the sample soils, the sedimentation volume and the consistency limits decreased gradually with the decrease in soil water content after the air-drying treatment. The porosity of the sample soils decreased from  $0.67\sim 0.87\text{m}^3/\text{m}^3$  to  $0.58\sim 0.66\text{m}^3/\text{m}^3$  and the liquid-phase range decreased from  $0.41\sim 0.83\text{m}^3/\text{m}^3$  to  $0.29\sim 0.71\text{m}^3/\text{m}^3$ . The solid-phase range of sample soils increased  $0.13\sim 0.33\text{m}^3/\text{m}^3$  to  $0.24\sim 0.37\text{m}^3/\text{m}^3$  same as above with air-drying treatment. In conclusion the air-drying treatment caused an irreversible effect on some physical properties. Accordingly, these facts indicate that the effects of air-drying treatment on these properties are considered to be resulted from irreversible changes in the structural status of the sample soils.

*Key Words: Planting Soil, Soil Drying, Consistency, Saturated Hydraulic Conductivity*

## 1. 서론

수저 퇴적물은 육지로부터 유입되거나 내부적인 생·화학적 작용을 통해 호소, 하천, 하구, 바다 등의

바닥에 쌓이는 자갈, 모래, 점토, 유기물질, 광물질을 통칭한다(이창희와 김은정, 1998). 이러한 퇴적물은 오래 전부터 자연자원의 이용, 이수, 치수 및 수운과 관련된 측면에서 관리의 대상이 되어 왔다. 즉 건설 골재의 원

료나 수로의 수심 감소 원인이 되는 모래, 자갈 등은 집중적인 준설 대상이 되어 왔으며, 하천 통수량의 확보를 위한 하천 정비 또는 홍수 통제 사업의 대부분도 수저 퇴적물의 준설을 수반한다. 이러한 준설 퇴적물 관리의 핵심은 준설된 대량의 수저 퇴적물을 어떻게 효율적으로 처분할 것인지에 달려 있다. 대부분의 경우, 항구 및 수로 유지를 위해 준설된 퇴적물은 운반이 용이한 근처의 수계에 처분장을 만들어 투기하거나 대규모 매립공사와 함께 준설이 실시될 경우에는 매립용으로 사용되는 것이 보통이다. 해양수산부 통계자료에 따르면 2003년에만 2,400만<sup>3</sup>의 준설토가 발생하였고(해양수산부, 2003), 90년대 중반 이후 급격한 증가 추이로부터 판단해 볼 때 향후 발생량은 매년 증가될 것이 예상되지만 현재 처분지와 매립지가 부족하여 단순 매립 처리만이 이루어지고 있는데, 일본 건설성 자료에 따르면 1998년 약 5,000만<sup>3</sup>의 준설토가 발생하였으나 내륙 및 해안 매립 공사 등에 재활용은 약 30% 수준이라고 보고되었다(建設發生土利用技術マニュアル檢討委員會, 1998). 이러한 준설토는 매립 비용의 증가와 더불어 해양 환경 문제를 초래하고, 연근해 어류 생태계에 심각한 영향을 미치는 등의 문제점이 부각되고 있다. 따라서 점점 심각해지고 있는 이러한 문제를 해결하기 위하여 준설토의 재활용 및 처리 기술의 개발이 요구되고 있다. 한편 산업 시설의 확충과 항만, 택지 개발 등과 같은 기반 시설의 신설 및 확장은 양질의 매립 및 성토 재료를 필요로 한다. 부산 신항만 건설공사, 광양만 개발공사, 서해안 개발공사 등에서는 매립, 성토재료로서 대량의 토사를 사용하고 있지만 환경보전의 중요성 등을 감안할 때 대량의 육상토나 해사를 사용하는 게 어려울 뿐만 아니라 상당한 비용이 소요된다. 따라서 준설토를 매립, 성토재료로 재활용하는 방안을 적극 검토하는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

김원태와 윤용한(2005)은 준설토의 이화학적 성분분석을 통해 식재 지반 용토로서의 재활용 가능성을 제시하였는데, 준설토의 경우 장기간 수저에 퇴적된 관계로 토양구조의 발달이 미약하다는 점(佐藤敦, 1987; 佐藤照男, 1995; 山本章吾와 柳井雅美, 1996)이 식재지반 용토로 활용하는데 있어서 가장 큰 걸림돌이 된다고 할 수 있다. 한편으로 생성요인 및 생성과정이 유사한 간척지 사례 연구(Pons and Van Der Molen, 1973)에 따

르면 간척지 조성 후 토층은 토양수분 감소에 따라 급격한 형태 변화를 일으키는데 일반적으로 이러한 과정을 숙성화(ripening)라 하며, 특히 물리적 숙성화란 증발산과 배수에 의한 토양수분 감소에 기인하는 현상으로 그 과정은 토층으로부터의 탈수와 수축, 균열의 발달, 투수성의 증가, 토양 결지성 한계의 변화를 거쳐 토양 구조의 발달로 이어진다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 탈수 건조 과정에서 토양수분 감소에 따른 준설토의 물리성 변화를 분석하고, 이를 바탕으로 준설토의 물리적 특성을 개선하는 방안을 모색하고자 하였다. 본 연구는 준설토의 물리적 특성을 개선할 수 있는 방안을 제시함으로써 준설토를 조경 식재지의 객·복토용 재료로 재활용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

공시 토양은 동경만 동경국제공항 확장 공사 준설 매립 현장에서 채취한 해수 준설토 1점과 이바라키(茨城)현 카스미가우라(霞ヶ浦), 사가(佐賀)현 농수로, 사이타마(埼玉)현 오바가와(大場川) 준설 매립 현장에서 채취한 담수 준설토 3점을 포함해서 총 4점(이하 각각 '하네다', '카스미가우라', '사가', '오바가와'라고 한다)을 대상으로 하였으며, 각각의 채취 장소는 그림 1에 나타낸 바와 같다. 토양 시료는 1998년 1월~8월 사이에 준설 매립 현장에서 이물질이 혼입되어 있지 않은 장소를 택해 채취하고, 밀봉하여 실험실로 가져와 분석하였다. 또한 탈수 건조에 의한 토양수분 감소에 따른 토양물리

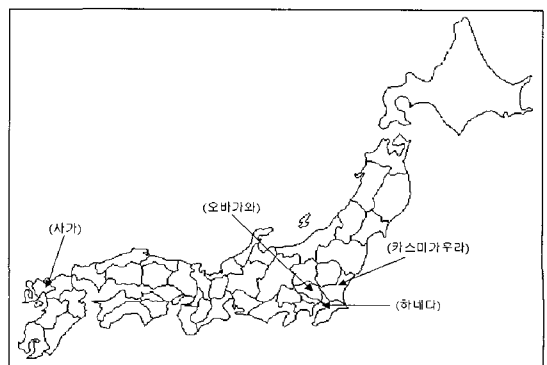


그림 1. 공시토양의 채취장소

성 변화를 파악하기 위해 채취 당시의 준설토(이하 '건조전'이라고 한다), 채취 당시의 준설토를 풍건한 준설토(이하 '풍건토'라고 한다) 그리고 채취 당시 준설토를 밀면에 배수 구멍이 뚫린 플라스틱 건조 박스(규격: 20×15×15cm)에 전체적으로 균일하도록 주의 하며 채워 넣은 후 적사광선이 닿지 않는 실내에서 토양수분 상태 및 토양면 균열 등을 관찰하며 각 건조 단계별 분석 시료(이하 각각 '건조단계 1', '건조단계 2', '건조단계 3'이라고 한다)를 채취하여 건조 특성 분석에 이용하였다. 여기에서 건조단계 1은 pF 1.4~1.7정도까지 건조된 상태로, 발생된 토양면 균열도 준설토의 유동성에 의해 다시 소실되는 특징이 있다. 건조단계 2는 pF 1.7~2.0정도까지 건조된 상태로 발생된 준설토가 유동성을 완전히 소실함으로 토양면 균열이 확실히 남아 있는 특징이 있다. 건조단계 3은 pF 2.3~2.6까지 건조된 상태로 토양면 균열뿐만 아니라 내부까지 2차 균열이 발달된 특징이 있다. 표 1에 각 건조단계별 공시 토양의 토양수분상태를 나타내었다.

토양 시료의 조제는 土壤環境分析法(安西徹朗 등, 1997)에 준하여 실시하였다. 또한 탈수 건조전 공시 토양의 물리·화학적 특성은 土壤物理性測定法(秋田豊 등, 1975)과 土壤環境分析法(安西徹朗 등, 1997)에 준하여 입자 밀도, 입도 조성, 토양 수분 함량, 토양 반응(pH), 토양 유기물 함량(OM), 유효 인산, 치환성 양이온 함량, 전기전도도(EC), 양이온 치환용량(CEC)을 측정, 분석하였다. 또한 공시 토양의 건조 특성으로 탈수 건조에 의한 토양수분 감소에 따른 공시 토양의 토양물리성 변화를 파악하기 위해 변수위법에 의한 포화투수계수, 수중침적용적 및 액성·소성한계, 실용적법에 의한 삼상분포를 土壤物理性測定法(秋田豊 등, 1975)과

표 1. 각 건조단계별 공시 토양의 토양수분함량(단위: kg/kg)

구분	해수 준설토	담수 준설토		
	하네다	카스미가우라	사가	오바가와
건조전	1.26	2.45	1.63	0.45
건조단계 1	1.11	1.75	1.34	0.38
건조단계 2	1.01	1.23	1.20	0.33
건조단계 3	0.93	1.15	1.15	0.29
풍건토	0.11	0.09	0.08	0.04

土の試験實習書(飯竹重夫 등, 1991)에 준하여 측정, 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 공시 토양의 물리·화학적 특성

탈수 건조전 공시 토양의 물리·화학적 특성은 표 2와 3에 나타낸 바와 같다. 공시 토양의 물리적 특성 중 입자 밀도는 2.46~2.74kg/m<sup>3</sup>의 범위를 나타냈으며, 토성은 사양토인 오바가와를 제외하면 모두 점토 함량이 75% 이상인 식토로 분류되었다. 한편 토양 수분 함량의 경우 하네다, 카스미가우라, 사가가 오바가와에 비해 상대적으로 높은 값을 나타냈는데 이는 비표면적이 큰 점토를 다량으로 함유한 관계로 많은 물을 보유할 수 있었기 때문이라고 판단된다.

해수 준설토인 하네다의 경우 담수 준설토에 비해 토양 분산제 역할을 하는 나트륨 함량이 높기 때문에 강알칼리성을 나타냈으며, 전기전도도 역시 높았다. 이러한 경향은 우리나라 입해 매립지 식재 지반과 매우 유사한

표 2. 탈수 건조전 공시 토양의 물리적 특성

구분	입자밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	입도조성			토성	토양수분함량 (kg/kg)	
		모래(%)	미사(%)	점토(%)			
해수 준설토	하네다	2.66	2.0	20.0	78.0	식토	1.26
	카스미가우라	2.55	1.0	22.0	77.0	식토	2.45
담수 준설토	사가	2.46	2.6	21.5	75.9	식토	1.63
	오바가와	2.74	72.7	8.5	18.8	사양토	0.45

표 3. 탈수 건조전 공시토양의 화학적 특성

구분	토양반응 (H <sub>2</sub> O)	유기물함량 (g/kg)	유효인산 (mg/kg)	치환성 양이온 (cmol/kg)				전기전도도 (dS/m)	양이온 치환용량 (cmol/kg)	
				K	Na	Ca	Mg			
해수 준설토	하네다	8.2	44	25	2.0	17.2	9.2	5.1	11.80	34.2
담수 준설토	카스미가우라	6.5	48	20	1.2	0.3	10.9	7.9	0.79	38.1
	사가	6.8	41	22	1.6	0.7	8.6	7.3	0.31	35.0
	오바가와	7.6	5	19	0.2	0.2	3.5	2.1	0.42	8.7

토양 특성이라 할 수 있으며, 만약 해수 준설토를 조경 식재지의 객·복토용 재료로 재활용하고자 할 경우 매립 후 과량의 염류로 인한 식물 생육 장애가 발생할 가능성이 있다고 판단되므로 염해에 대한 대책 마련이 필요하다고 판단된다. 또한 토양 유기물 함량, 유효 인산, 치환성 양이온 함량, 양이온 치환 용량 등은 퇴적 수역에 관계없이 오바가와가 상대적으로 다른 공시토양에 비해 낮은 경향을 나타냈는데 이것 역시 앞서 언급한 입도 조성의 차에 기인한 결과라고 판단된다.

## 2. 토양수분 감소에 따른 용적밀도의 변화

일반적으로 토양의 용적 밀도는 토양 유기물 함량, 토성 및 구조에 따라 변하며, 우리나라 농경지 양토의 경우 평균 용적 밀도는 약 1.10~1.40kg/m<sup>3</sup>의 범위로 알려져 있다(유순호와 임선욱, 1994). 표 4는 각 건조단계별 공시 토양의 용적 밀도를 나타낸 것으로 건조전 단계의 용적 밀도는 0.34~0.90kg/m<sup>3</sup>의 범위를 나타냈으나, 탈수 건조가 진행됨에 따라 점차 증가하여 풍건토에서는 0.86~1.14kg/m<sup>3</sup>의 범위를 나타냈다. 이와 같이 건조에 따라 용적 밀도가 증가한 원인으로는 토양 입자간 수막에 발생하는 표면 장력에 의해 토양 입자들이 불가역적으로 응집한 결과라고 판단되며, 이에 대해서는 福土定雄(1985) 역시 건조에 의해 토양 입자간 응집이 발생하며, 이로 인해 토양의 역학적 강도가 증대된다고 하였다. 또한 Pons and Van Der Molen(1973)는 간척지의 경우 간척 후 토층으로부터의 탈수와 수축, 균열의 발달, 투수성의 증가, 토양 결지성 한계의 변화를 거쳐 토양 구조가 발달한다고 하였다. 한편 풍건토의 용적 밀도는 카스미가우라가 가장 낮았으며, 다음으로 사가, 하

표 4. 각 건조단계별 공시토양의 용적밀도(단위: kg/m<sup>3</sup>)

구분	하네다	카스미가우라	사가	오바가와
건조전	0.60	0.34	0.48	0.90
건조단계 1	0.66	0.45	0.55	0.93
건조단계 2	0.70	0.59	0.59	0.95
건조단계 3	0.74	0.62	0.61	1.01
풍건토	0.93	0.86	0.92	1.14

네다, 오바가와 순이었으며, 용적 밀도와 점토 함량과의 관계는 점토 함량이 증가할수록 용적 밀도가 감소한다는 연구 결과(김현근, 1983)로부터 본 실험의 결과 역시 미사 및 점토 함량에 기인한 결과라고 판단된다. 또한 공시 토양간 용적 밀도의 변동 폭은 미사 및 점토 함량이 많은 카스미가우라가 가장 컸으며, 다음으로 사가와 하네다, 그리고 상대적으로 모래 함량이 많은 오바가와가 가장 적었다.

## 3. 토양수분 감소에 따른 토양삼상분포의 변화

토양은 고상, 액상, 기상의 삼상으로 구성되어 있으며, 이들의 용적비를 토양 삼상 분포라 하는데 이는 토양의 종류, 건조, 깊이 등에 따라 다르다. 액상은 양수분의 보유 및 이동, 기상(대공극량)은 산소의 공급이나 강우 때 배수와 밀접한 관계에 있다(長野間宏, 1994). 따라서 포장에서 토양 구조를 양적으로 나타내는 지표로서 토양 삼상 분포는 토양 구조의 유력한 파악 수단이라 할 수 있다(藤原俊六郎 등, 1996).

표 5는 각 건조단계별 공시토양의 토양 삼상 분포를 나타낸 것이다. 분석 결과 공시토양이 생성과정에서 받

표 5. 각 건조단계별 공시토양의 토양삼상분포(단위:  $m^3/m^3$ )

구분	하네다				카스미가우라			
	고상율	공극율	액상율	기상율	고상율	공극율	액상율	기상율
건조전	0.23	0.77	0.76	0.02	0.13	0.87	0.83	0.03
건조단계 1	0.25	0.75	0.73	0.02	0.18	0.82	0.79	0.04
건조단계 2	0.26	0.74	0.71	0.03	0.23	0.77	0.73	0.04
건조단계 3	0.28	0.72	0.69	0.03	0.24	0.76	0.71	0.04
풍건토	0.35	0.65	-	-	0.34	0.66	-	-

(표 5 계속)

구분	사가				오바가와			
	고상율	공극율	액상율	기상율	고상율	공극율	액상율	기상율
건조전	0.20	0.80	0.78	0.02	0.33	0.67	0.41	0.27
건조단계 1	0.22	0.78	0.74	0.04	0.34	0.66	0.35	0.31
건조단계 2	0.24	0.76	0.71	0.05	0.35	0.65	0.31	0.34
건조단계 3	0.25	0.75	0.70	0.05	0.37	0.63	0.29	0.34
풍건토	0.37	0.63	-	-	0.42	0.58	-	-

은 주변 환경의 영향 때문에 공시토양의 건조전 단계 공극율은  $0.67\sim 0.87m^3/m^3$ 의 범위를 나타냈으나 건조가 진행됨에 따라 점차 감소하여 풍건토의 공극율은  $0.58\sim 0.66m^3/m^3$ 의 범위를 나타냈다. 또한 건조전 단계에서 건조단계 3까지 건조가 진행됨에 따라 액상율의 범위는  $0.41\sim 0.83m^3/m^3$ 에서  $0.29\sim 0.71m^3/m^3$ 으로 감소하였으나 상대적으로 고상율의 범위는  $0.13\sim 0.33m^3/m^3$ 에서  $0.24\sim 0.37m^3/m^3$ 으로 증가하였다. 한편 기상율은 거의 변화가 없었다. 이것은 탈수 건조에 따라 토양입자가 불가역적으로 응집한 결과 고상율은 증가한 반면 액상율은 감소하였다고 판단된다. 또한 고상율과 액상율의 증감폭은 미사와 점토 함량이 많았던 하네다, 카스미가우라, 사가가 오바가와에 비해 상대적으로 컸다. 그러나 투수와 통기에 관여하는 대공극량의 척도인 기상율의 경우 오바가와를 제외한 모든 공시토양이 거의 변화가 없었으며, 그 값에 있어서도 이상적인 농경지 토양의  $0.25m^3/m^3$ 에 비해 매우 낮아 조경 식재지 객·복토용 재료로서 재활용하기 위해서는 탈수 건조에 의한 높은 토양수분 상태의 개선과 더불어 유기물 시용 및 경운 등을 통해 투수와 통기에 관여하는 토양 구조의 개선이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 토양수분 감소에 따른 수중침적용적 및 액성·소성한계 변화

물 속에서 토양이 중력에 의해 침강되었을 때 토양 입자계가 차지하는 용적을 수중 침적 용적이라 하며 (류순호 등, 2000), 점토의 함량, 형상, 광물 조성, 입단의 상태, 건조 이력 등을 종합적으로 나타내는 물리적 특성의 하나로, 일반적으로 입단화된 토양보다는 분산된 토양에서 높다고 보고되었다(竹中肇 등, 1983). 표 6은 공시토양의 수중 침적 용적을 나타낸 것이다. 분석 결과 모든 공시토양의 수중 침적 용적은 건조전 단계에 비해 풍건토가 낮은 값을 나타냈다. 다시 말해 건조처리로 공시토양의 수중 침적 용적이 감소하였음을 나타내고 있다.

기존 연구 결과에 따르면 건조에 의한 토양 물리적 특성 변화 원인은 미세입자의 결합에 의한 입단화(神山光男, 1959), 친수성에서 소수성으로 토양의 계면 특성 변화(山崎不二夫와 竹中肇, 1965), 토양입자의 입단화에 따른 토양 비표면적의 감소(相馬勉之와 前田隆, 1974) 때문이라고 보고하였다. 따라서 본 시험의 결과 역시 상술한 원인이 종합적으로 관계한 결과라고 판단된다. 또한 靑峰重範(1948)는 시험을 통해 수중 침적 용

표 6. 공시토양의 수중침적용적(단위: L/kg)

구분	하네다	카스미가우라	사가	오바가와
건조전	5.06	8.36	6.54	1.84
풍건토	2.20	4.62	3.92	1.51

적 감소에 따라 투수성이 개량된다고 보고하였으며, 이러한 점들로 미루어 볼 때 수중 침적 용적의 분석과 뒤에 언급한 포화 투수 계수의 분석은 준설토의 토양 개량 및 시공 후 효과를 판정하는 중요한 지표라고 판단된다.

한편 토양의 수분함량이 달라지면 외력에 의한 유동·변형에 대한 저항성 즉 토양 결지성이 달라진다. 수분상태에 의한 결지성 형태의 전이점은 수분함량으로 결정하는데 이를 결지성 한계라 한다. 결지성 한계 중 현재 중요하게 다루어지고 것은 액성 한계(Liquid Limit: LL), 소성 한계(Plastic Limit: PL)와 소성 지수(Plastic Index: PI)이다. 소성 한계와 액성 한계는 각각 토양의 소성을 나타내는 최소 및 최대의 수분함량을 의미하며, 그 차를 소성지수라 한다. 특히 액성 한계는 일반적으로 토양 결지성의 형태가 점성의 액체로부터 소성으로 이행하는 전이점의 토양수분함량이다. 따라서 액성 한계는 토양의 비표면적 또는 점도함량, 점도광물의 종류, 치환성 양이온의 종류, 부식함량 등에 따라 차이가 있어 토양의 압축성, 토양입자의 수분 보유도 및 공극량의 중요 지표이다(류순호 등, 2000). 또한 山崎不二夫와 竹中肇(1965)는 연구를 통해 토양 결지성 한계를 지배하는 내적 요인으로 점도함량 이외에 점도광물의 조성, 유기물함량, 치환성양이온 등을 들었으며, 외적 요인으로서의 풍건처리에 의해 결지성 한계가 큰 영향을 받으며, 특히 액성 한계의 감소가 두드러진다고 하였다. 久

保田徹(1976) 역시 토양 콜로이드의 집합상태는 건조에 다양한 변화를 받는다고 하였고, 구체적인 내용으로 점토의 불가역적 응집, 수분 보유량의 감소, 액성 한계·소성 한계의 감소 등을 들었으며, 이밖에도 균열의 형성, 수축 등으로 토양 콜로이드의 2차적 집합상태가 강해져 토양 구조 형성을 이룬다고 하였다. 또한 화산회토를 대상으로 실시한 건조처리 실험 결과 건조 정도에 따라 점차 점토와 미사함량은 감소하고, 모래함량은 증가하였다고 하였다.

분석 결과 오바가와를 제외한 모든 공시토양의 액성 한계는 건조전 단계에서 최대치를 나타냈으며, 건조가 진행됨에 따라 건조단계 3까지 오차 범위 내의 감소 정도를 나타내 뚜렷한 감소 경향을 확인할 수 없었으나 풍건토에 이르러서는 급격히 감소하는 경향을 나타냈다(표 7 참조). 한편 오바가와와 경우 이미 입도 조성 결과에서 확인된 바와 같이 다량의 모래성분이 함유된 관계로 본 결지성 한계 측정이 불가능하였다. 또한 소성한계는 건조전 단계에서 풍건토까지 뚜렷한 감소 경향을 보이지 않았다. 한편 액성 한계와 소성한계의 차인 소성지수는 주로 액성 한계 변화의 영향을 받아 액성한계와 동일한 경향을 나타냈다.

이와 같이 결지성 한계의 감소 경향 특히 액성 한계의 감소 경향은 앞서 논한 수중 침적 용적의 변화 양상과 매우 유사하며, 원인에 있어서도 앞서 언급한 바와 같이 건조처리에 의한 토양입자의 응집에 따른 토양 비표면적의 감소 등에 기인한 결과라고 판단된다.

그림 2는 표 7의 결과 중 각 공시토양의 액성 한계를 X축에, 소성지수를 Y축에 취한 소성도(塑性圖)이다. 일반적으로 소성도의 중요한 사항은 실험적으로 구한

표 7. 각 건조단계별 공시토양의 액성·소성한계 및 소성지수\*

구분	하네다			카스미가우라			사가		
	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수
건조전	111	38	73	221	84	137	173	55	118
건조단계 1	108	38	70	217	84	133	165	55	110
건조단계 2	107	38	69	214	83	131	160	54	106
건조단계 3	103	37	66	198	82	116	142	54	88
풍건토	71	35	36	127	65	62	98	49	49

\*: 오바가와와 경우 다량의 모래성분이 함유된 관계로 결지성한계 측정 불가능

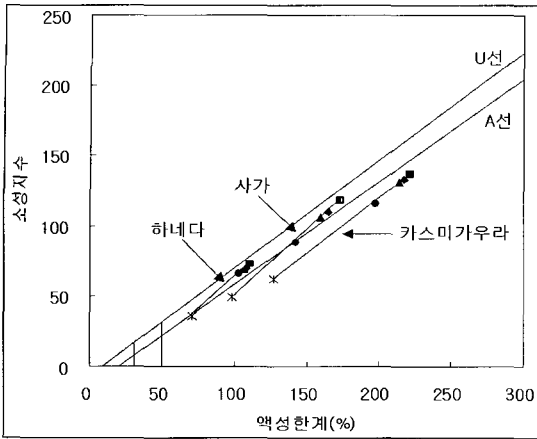


그림 2. 각 건조단계별 공시토양의 소성도

범례: ■- 건조전, ◆- 건조단계 1, ▲- 건조단계 2,  
●- 건조단계 3, \*- 풍건토

A선의 식, 즉  $PI=0.73(LL-20)$ 이다. A선은 무기질 점토와 무기질 미사를 분리시킨다. 무기질 점토 값은 A선 상부에 해당되고, 무기질 미사 값은 A선 하부에 해당된다. 유기질 미사는 중간 정도의 압축성을 갖는 무기질 미사와 같은(A선 하부이며, 액성 한계는 30~50 사이) 범위에 속한다. 유기질 점토는 압축성이 큰(A선 하부이며, 액성 한계는 50 이상) 무기질 미사와 같은 위치에 속한다. 한편 A선 위에 U선( $PI=0.9(LL-8)$ )이 위치하는데 현재까지 알려진 토양에 대한 소성지수와 액성 한계 관계의 상한선이다. 따라서 소성도에 의하여 제공되는 정보들은 매우 중요하며, 통일분류법에서 세립토를 구분하는 기준이 된다(김영수, 2003). 이에 준해 본 실험의 결과를 분석해 보면 하네다, 카스미가우라, 사가 모두 A선을 따라 액성 한계 30~50으로 접근하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 건조에 의해 토양입자가 응집한 결과 토양 비표면적이 감소하였기 때문

이라고 판단되며, 이로 인해 점토의 공학적 특성 역시 변화가 발생했다고 생각된다.

## 5. 토양수분 감소에 따른 포화투수계수의 변화

표 8은 각 건조단계별 공시토양의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 공시토양 건조전 단계의 포화투수계수 범위는  $1.20 \times 10^{-6} \sim 2.18 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 를 나타내 오바가와를 제외한 공시토양의 투수성이 불량한 것으로 판단되었다. 또한 건조가 진행됨에 따라 건조전 단계에게 건조단계 3까지의 포화투수계수는 감소하였다. 이것은 토양의 용적밀도가 증가함으로써 투수에 기여하는 공극량이 감소하였기 때문이라고 판단된다. 그러나 풍건토의 경우 포화투수계수는 오히려 증가하여 건조전과 비슷하거나 이를 상회하였다. 이것은 자연상태에서 건조처리의 최대 한계인 풍건에 의해 토양입자가 불가역적으로 응집한 결과 투수에 유효한 구조공극이 증가하였기 때문이라 판단된다. 하지만 본 시험의 목적인 탈수 건조에 의한 토양구조의 변화는 확인할 수 있었으나 이에 따른 투수성의 증대는 확인할 수 없었다. 이것은 건조단계 2와 3의 포화투수계수가 균열이 포함되지 않았거나 또는 균열이 포함되었더라도 균열의 연속성이 확보되지 않은 토양매체 부분의 측정에 의한 결과라고 판단된다. 그러나 井上久義 등(1988)은 포장시험을 통해 균열을 포함한 토양의 투수성이  $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ 까지 증대된다고 보고하였으며, 이를 토대로 추정해 볼 때 작은 균열일지라도 투수성에 크게 영향을 미치리라 예상된다. 이상의 결과로부터 토양구조 발달이 미약한 준설토의 경우 탈수 건조에 의한 토양입자의 응집, 균열의 발달, 투수성의 증가, 토양 결지성 한계의 변화를 거쳐 토양구조

표 8. 각 건조단계별 공시토양의 포화투수계수(단위: cm/s)

구분	하네다	카스미가우라	사가	오바가와
건조전	$1.32 \times 10^{-6}$	$1.20 \times 10^{-6}$	$3.23 \times 10^{-6}$	$2.18 \times 10^{-3}$
건조단계 1	$8.95 \times 10^{-7}$	$4.17 \times 10^{-7}$	$5.82 \times 10^{-7}$	$2.15 \times 10^{-3}$
건조단계 2	$8.79 \times 10^{-7}$	$4.02 \times 10^{-7}$	$5.69 \times 10^{-7}$	$1.58 \times 10^{-3}$
건조단계 3	$2.08 \times 10^{-7}$	$1.83 \times 10^{-7}$	$3.15 \times 10^{-7}$	$1.08 \times 10^{-3}$
풍건토	$3.26 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-6}$	$3.48 \times 10^{-6}$	$2.56 \times 10^{-3}$

의 변화를 유도하는 것이 조경식재지 객·복토용 재료로서 재활용하기 위한 선결조건이라 생각된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 현재 대량 발생되고 있는 준설토의 처분과 관련하여 해수준설토 1점과 담수준설토 3점을 포함해서 총 4점을 대상으로 탈수 건조에 의한 토양수분 감소에 따른 준설토의 토양물리성 변화를 밝혀 조경식재지 객·복토용 재료로서의 재활용 가능성을 파악하기 위한 기초자료로 활용하고자 수행되었으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 건조전 단계의 용적밀도는  $0.34 \sim 0.90 \text{kg/m}^3$ 의 범위를 나타냈으나 탈수 건조가 진행됨에 따라 점차 증가하여 풍건토에서는  $0.86 \sim 1.14 \text{kg/m}^3$ 의 범위를 나타냈다.

2) 건조전 단계의 공극율은  $0.67 \sim 0.87 \text{m}^3/\text{m}^3$ 의 범위를 나타냈으나 건조가 진행됨에 따라 점차 감소하여 풍건토의 공극율은  $0.58 \sim 0.66 \text{m}^3/\text{m}^3$ 의 범위를 나타냈다. 또한 건조전 단계에서 건조단계 3까지 건조가 진행됨에 따라 액상율의 범위는  $0.41 \sim 0.83 \text{m}^3/\text{m}^3$ 에서  $0.29 \sim 0.71 \text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 감소하였으나 상대적으로 고상율의 범위는  $0.13 \sim 0.33 \text{m}^3/\text{m}^3$ 에서  $0.24 \sim 0.37 \text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 증가하였다. 한편 기상율은 거의 변화가 없었다.

3) 건조가 진행됨에 따라 수중 침적 용적 및 액성·소성한계는 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 건조가 진행됨에 따라 건조전 단계에서 건조단계 3까지의 포화 투수계수는 감소하였으나 풍건토의 경우 오히려 증가하여 건조전 단계와 비슷하거나 이를 상회하였다.

4) 이상의 결과로부터 생생과정상 토양구조의 발달이 매우 미약하여 투수계수가 낮아진 것이 문제가 되고 있는 준설 매립 식재지반에서는 준설 후 조속한 탈수 건조에 의하여 토양입자의 응집, 균열의 발달, 투수성의 증가, 토양 결지성 한계의 변화를 거쳐 토양구조를 발달시키는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 이러한 탈수 건조를 통하여 물리적 숙성화가 이루어진다면 준설토를 조경 식재지의 객·복토용 재료로 재활용할 수 있는 가능성을 한층 더 높여줄 것으로 판단된다.

2. 김원태, 윤용한(2005) 식재지반 용토로서 준설토의 이화학적 특성. 한국조경학회지 32(6): 95-102.
3. 김현근(1983) 흙의 물리적 성질이 다짐에 미치는 영향에 관한 실험적 연구. 동국대학교 대학원 석사학위논문.
4. 류순호, 김계훈, 김민균, 박무언, 양재의, 유인수, 윤세영, 이완주, 임정남, 정연태, 정영상(2000) 토양사전. 서울: 서울대학교 출판부.
5. 유순호, 임선옥(1994) 토양비료. 서울: 한국방송통신대학교출판부.
6. 이창희, 김은정(1998) 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안. 한국환경정책·평가연구원 보고서.
7. 해양수산부(2003) 해양수산통계연보.
8. 青峰重範(1948) 土壤の水中沈定容積におよぼす風乾の影響(第2報): 風乾處理による水中沈定容積の收縮. 日土肥誌 19(2): 35-36.
9. 秋山豊, 石井和夫, 加藤一郎, 川村秋男, 木下彰, 椎名乾治, 美園繁(1975) 土壤物理性測定法. 東京: 養賢堂.
10. 飯竹重夫, 岩崎公俊, 風間秀彦, 佐藤剛司, 社本康廣, 中山晴幸, 西澤潤, 東山勇, 卷内勝彦(1991) 土の試験實習書. 東京: 土質工學會.
11. 井上久義, 長谷川周一, 宮崎毅(1988) 龜裂が發達した圃場における水の横浸透. 農土論集 134: 51-60.
12. 神山光男(1959) 試料の乾燥状態が土の稠度に及ぼす影響. 土の基礎 7(1): 44-47.
13. 久保田徹(1976) 火山灰土壤の界面化學的研究 脱水に伴う土壤の不可逆凝集の現象と機構を中心として. 農業技術研究所報告 B21(1): 1-74.
14. 建設發生土利用技術マニュアル檢討委員會(1998) 建設發生土利用技術マニュアル. 東京: 土木研究センター.
15. 佐藤敦(1987) 八郎瀧低濕重粘土における土壤構造の發達過程と理化學性の変化. Bulletin Akita Prefectural College Agriculture 13: 1-49.
16. 佐藤照男(1995) 干拓地土壤における間隙構造の發達と物理性の改善に関する研究. Bulletin Akita Prefectural College Agriculture 25: 1-69.
17. 相馬烈之, 前田隆(1974) 土壤水分の變動と物理・化學性の変化. 土壤の物理性 55: 37-43.
18. 竹中肇, 足立忠司, 中野政詩, 東山勇, 前田隆(1983) 土の理工學性實驗ガイド. 東京: 農業土木學會.
19. 長野間宏(1994) 農耕地における土壤診斷の研究ならびに診斷指標と手法の開發1: 土壤の物理診斷. 日土肥誌 65(3): 341-348.
20. 福士定雄(1985) 土壤物理學概論. 東京: 博友社.
21. 藤原俊六郎, 安西徹郎, 加藤哲郎(1996) 土壤診斷の方法と活用. 東京: 農山漁村文化協會.
22. 安西徹郎, 加藤哲郎, 長谷川周一, 中井信, 波多野隆介, 田中樹(1997) 土壤環境分析法. 東京: 博友社.
23. 山崎不二夫, 竹中肇(1965) 風乾がアッタベルグ限界に及ぼす影響. 農土論集 14: 46-48.
24. 山本章吾, 柳井雅美(1996) 笠岡湾干拓地の土壤改良に関する研究(第1報): 圃場造成後の土壤理化學性の経年推移. 山岡農驗研報 14: 63-70.
25. Pons, L. J. and W. H. Van Der Molen(1973) Soil genesis under dewatering regimes during 1,000 years of polder development. Soil Science 116: 228-235.

#### 인용문헌

1. 김영수 역(2003) 토질역학. Braja, M. D., Principles of Geotechnical Engineering. 서울: 사이텍미디어.

원 고 접 수: 2004년 6월 1일

최종수정본 접수: 2006년 4월 26일

3인익명 심사필