

## 浚渫埋立地盤의 設計 및 施工時의 考慮事項

### A Consideration of the Design and Construction on the Dredging and Reclamation Area

이 송, Song-Lee

서울시립대학교 토목공학과 교수, Prof., Dept of Civil Eng. University of Seoul

**SYNOPSIS** : In Korea, The planning and design of reclamation areas for dredged material has been and continues to be an issue of national importance because of the need to maximize economic benefits and enlarged the areas. The major goals are to predict the time dependent capacity reclamation area and to analysis settlement rates under surcharge for reclamation project. In this paper is to present an overview of the geotechnical aspect in the planning, design and construction of artificial island in the costal area of korea. Also, In this paper, The estimation method on the the volume change ratio of dredged clay is discribed.

**KEYWORDS** : reclamation, dredged material, settlement, volume change ratio.

#### 1. 개 요

경제성장과 더불어 공업용지 및 주거용지와 공항, 항만 등의 수요가 날로 늘어나 해안매립을 통한 부지개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 영종도 신공항, 새만금간척사업, 울촌공단, 녹산국가공단 등의 건설추진으로 본격적인 해안개발시대에 접어들고 있다.

국내에서 매립초기에는 주로 쇄석이나 산토가 주 매립재료로 이용되었지만 매립기술과 장비가 발달한 지금은 바다에서 쉽게 구할 수 있는 해성점토를 그대로 활용하고 있다. 매립의 이상적인 재료는 투수성이 좋고 압축성이 작은 골재지만 이는 육지에서부터 운반하고 확보하는데 비용이 많이 들어 비경제적이다. 또한, 골재나 산토를 얻기 위해서는 산을 깎는 경우가 많아 환경훼손과 산사태나 홍수 등을 유발할 수 있어 여러 문제점을 내포하고 있다.

지금까지 국내에서 행해지고 있는 매립에 대한 일반적인 관행은 육지에서 토취장을 개발하고 여기에서 방조제 축조에 필요한 사석과 매립지에 소요되는 토사를 공급하는 것이다. 그러나, 매립공사가 활발해짐에 따라 육지에서 이용할 수 있는 토사가 점점 더 품귀해 질 것으로 전망되며 따라서, 준설토를 이용한 매립방법의 개발이 점차 중요시되고 있다. 이러한 준설토는 고풍수비이고 압축성이 크고 장기간에 걸쳐 압밀이 이루어지므로 안정성이 떨어진다. 또한, 준설토과정에서 미세한 점토입자가 대기중에 먼지처럼 수중에서 퍼져나가 환경오염의 문제를 유발할 수가 있다.

준설매립시에 필요한 부지를 확보하기 위해서 얼마나 흙을 준설해야 하는지와 소요강도를 얻는데 요구되는 압밀량과 압밀시간을 규명하는 것이 준설매립지반을 조성하는데 있어서 가장 중요한 요소이다. 우리나라의 해안에서 퇴적된 흙은 대하천의 하구를 제외하고는 점토 또는 실트가 대부분이고 모래성분의 상대적인 비율이 작기 때문에 퇴적된 재료가 드물다. 열악한 해상조건과 복잡한 연약지반으로 인하여 해안지역 개발에 많은 어려움이 있다. 국내의 해안지반은 퇴적토의 분포상태, 입도분포, 토립자의 형상, 흡착이온의 특성, 간극수질 등이 다양하고 조류 및 온도 등과 같은 퇴적환경에 크게 영향을 받아 퇴적 후에도 응력이력, 간극수질 변화, 용해작용 등에 의하여 다양한 흙의 구성구조와 결합형태를 갖는 토질특성을 지니고 있다.

더욱이 준설토에 의해 매립조성된 기초지반은 지지력이 거의 없는 슬러리 상태이며, 이러한 연약지반을 개량하는 데에는 기술적인 어려움이 매우 크다.

또한, 최근 들어 국내에서도 항로나 수로 유지를 위한 준설작업도 관심사로 떠오르고 있지만 경제적인 여건등으로 인하여 잘 시행되고 않고 있다. 특히, 금년과 같이 계절라성 집중호우로 수해가 증대한 원인 중 하나는 하상에 퇴적된 토사, 즉, 하상의 높이 증가이며, 이에 대한 처리가 문제점으로 대두되었다. 따라서, 국내에서도 부지조성을 위한 매립사업 뿐만 아니라 홍수시의 하천수심확보를 위한 준설에도 많은 관심을 기울여야 할 것이다.

## 2. 국내의 현황

### 2.1 국내 연안 퇴적토의 특성

지질학적으로 보면 홀로세의 해면상승으로 황해가 범람하였고 해면상승과 더불어 주로 대하천에서 운반된 미세한 입자들이 한반도의 해안을 따라 퇴적되었다. 따라서, 국내 해성토의 퇴적년대는 10,000년을 넘지 않는다. 금강 하구인 군산을 중심으로 한 서해안 일대의 해성토에 대한 X선 회절분석 결과 하구에서 황해쪽으로 60km에 이르기까지 점토광물인 카올리 나이트가 10% 이상으로 조사되었다. 이로 미루어 국내 해안을 따라 퇴적된 대부분이 연약한 점성토로 이루어졌다고 추정할 수 있다.

김(1987)의 조사에 의하면 국내 해안의 퇴적토층의 깊이는 일반적으로 25~30m를 넘지 않는다고 하였다. 그러나, 낙동강 하구의 퇴적층의 두께는 대단히 깊어 전체 두께가 85m나 되고 최하단의 모래층 두께가 60m로 조사된 바 있다. 하부의 모래층은 충적층이라 생각되므로 아마도 해수면 상승이전의 낙동강은 깊은 계곡이었을 것으로 추정된다. 퇴적층의 층순서는 해수면의 상승과 하강, 하천의 범람, 조류와 파랑의 작용 등 퇴적환경과 관련된다. 우리나라 해안의 상부로부터 하부로의 퇴적층 순서는 다음의 4가지 유형으로 구분할 수 있다.

- 1) 실트질 점토 - 실트질 모래 또는 모래질 실트 - 풍화암
- 2) 실트질 점토 - 자갈 또는 모래 - 풍화암
- 3) 실트질 모래 - 실트질 점토 - 풍화암
- 4) 모래 - 실트질 점토 - 모래 또는 자갈 - 풍화암

첫째 유형은 김포, 반월, 인천, 시화, 옥구, 군산, 목포 등 주로 서해안에 분포되어 있으며 우리나라 해성토의 대표적인 유형이다. 해수면의 상승이전에는 남해안과 서해안의 대하천은 지금의 해안에서 상당히 멀리까지 뻗어 있었을 것이므로 구하상을 따라 모래 및 자갈의 축적층이 존재하리라는 것을 충분히 짐작할 수 있다. 따라서, 풍화암위에 퇴적된 2) 유형의 자갈 또는 모래층은 해수위의 상승 이전 구하도에 퇴적된 축적층이라 사료된다.

인천, 김포지반의 간사지는 3)의 유형과 같은 퇴적특성을 나타낸다. 상부에 퇴적된 실트질 모래층은 주로 파랑과 큰 조차로 인한 조류에 의해 운반된 해성 퇴적층으로 추측된다. 섬진강 하부와 낙동강 하구에서 나타나는 퇴적특성은 4)의 유형을 보인다.

해수면의 상승이전 구하도를 따라 퇴적된 모래 또는 자갈층위에 해수면 상승이후 해성 퇴적층이 퇴적되었고 그 위에 두꺼운 모래층이 다시 퇴적되었다. 큰 하천을 통해 운반되는 퇴적물의 양과 속도가 크면 이와 같이 입자가 굵은 축적층의 퇴적물이 상부에 존재하게 될 것이다. 이상에서 언급한 퇴적층 순서로부터 관찰해 보면 기초지반이 될 수 있는 상부의 퇴적층은 연약한 점성토 또는 느슨한 사질토로 형성되었으므로 이 위의 매립지반은 과대한 침하가 예상될 수 있고 호안 또는 방조제가 이 층에 놓일 때에는 지지력과 활동의 문제가 발생할 수 있다. 또한, 낙동강 하구와 섬진강 하구에는 준설토로 이용할 수 있는 충분한 모래가 있으며, 금강하구, 아산만, 광양만의 일부지역에도 모래가 있으나 여기를 벗어나면 모래성분이 대단히 부족하다.

## 2.2 국내 시공현황

한국은 인구 밀도가 높고 산지가 전 국토의 2/3을 차지하고 있어서 이용할 수 있는 토지가 크게 제한을 받고 있다.

국내에서는 지금의 농어촌 공사의 모체가 된 조선토지 개량협회가 1938년에 설립되면서 수심이 비교적 얇은 서해안을 따라서 본격적인 매립공사가 시작되었다. 그러나, 초기 매립공사는 주로 인력에 의존하였으며 주로 소규모 공사만이 이루어졌다. 1970년대에 들어서면서 정부의 공업화 정책으로 대규모 산업기지 조성이 적극적으로 검토되기 시작하였으며, 마산 수출자유지역에 인접한 적현 기계공업지역에서 비교적 대규모의 매립공사가 최초로 건설부에 의해 시행되었다. 이 공업단지 조성시에는 매립지반에 대한 연약지반처리로서 페이퍼드레인 공법이 최초로 도입되었다. 그 후 포항, 온산, 창원, 마산, 거제에 이르는 동남해안 공업지역 대부분이 매립공사에 의해서 조성되었다. 또한, 산업발달에 따른 물동량의 증가로 인한 하역량을 처리하기 위해 부산과 인천지역의 항구는 준설과 매립에 의해 확장되고 개발되었다.

현재 시행되고 있는 매립공사는 간척사업, 공업단지 조성, 주거단지 조성 뿐만 아니라 쓰레기 매립, 도시기반의 조성, 공항건설에 이르기까지 다양한 목적을 가지고 수행되고 있다.

국내의 경우 해안매립은 목적에 따라 여러 기관에서 수행하고 있는데 현재 진행되고 있는 중요한 공사의 지역적인 분포현황은 그림 1과 같으며, 현재 국내에서 수행하고 있는 가장 큰 규모의 매립사업은 한국토지공사에서 시행하고 있는 군장지구와 농어촌진흥공사에서 수행하고 있는 새만금개발사업이라 할 수 있다.

현재까지 국내에서 많은 매립공사를 통해서 매립기술을 축척해왔지만 갈수록 공사여건이 나빠지기 때문에 더욱 어려움에 부딪히게 되리라 본다.

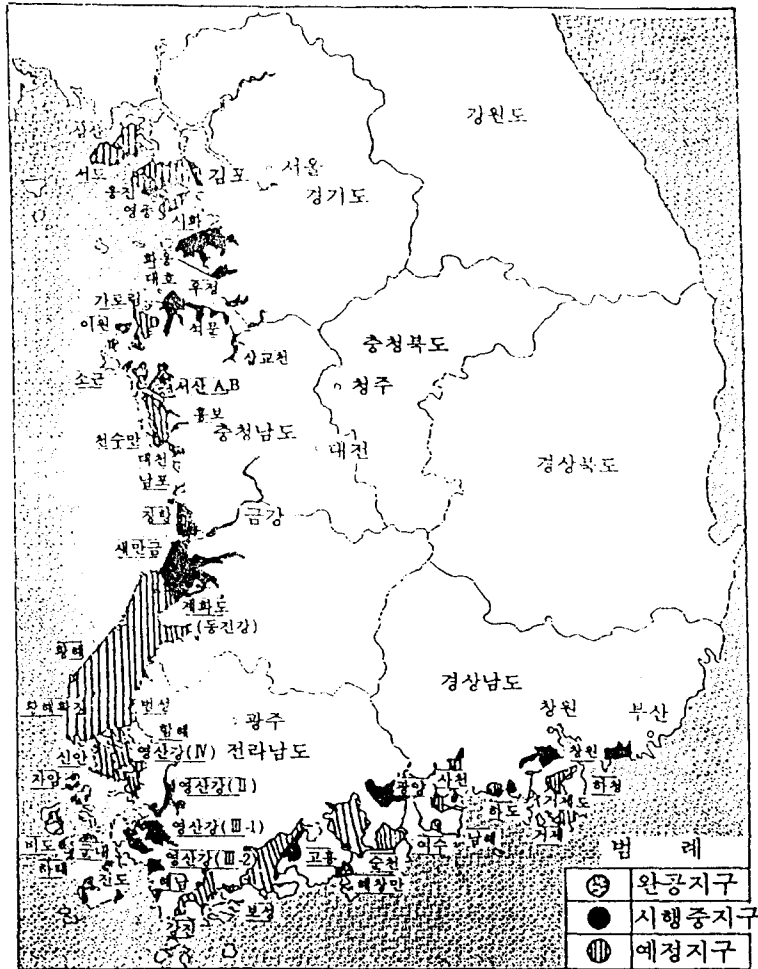


그림 1. 우리나라 서·남해안 개발도

### 3. 준설매립의 설계

#### 3.1 준설여건과 기증선정

준설은 수중에서의 토사굴착작업이기 때문에 대상지구의 여건과 준설량 및 공사기간 그리고 홀수심 유지가능 여부가 가장 큰 선정조건이 된다.

##### 3.1.1 기증선정

해상에서 이루어지고 있는 준설선은 주로 펌프 준설선을 이용하고 있으며 일반적인 준설선의 기증별 준설여건은 다음 표 1과 같다.

표 1. 기종별 준설조건

기종 조건	버켓선	쇠퍼선	그래브선	펌프선	쇄암선
준설능력	보통	작다	작다	크다	작다
준설단가	보통	고가	보통	저가	고가
토운선	필요	필요	필요	불필요	필요
준설후 굴곡	보통	크다	크다	크다	크다
최대토질조건	연암	연암	보통토사	보통토사	경암
작업점유수면	크다	작다	작다	작다	작다
건조비	보통	고가	보통	보통	고가
관정	사토거리가 면 곳에 유리	경질토사에 유리	협소한 장소의 연질토사에 적합	연질, 사질 토사에 접합	암반용

### 3.1.2 흡수심

담수호나 하천에서의 준설은 사수위 이상의 유효 저수량 확보나 홍수시의 수심확보가 목적이므로 관리수위부터 사수위까지가 주요 준설대상이 된다.

## 3.2 준설량의 산정

준설량은 자연상태의 준설하고자 하는 용적을 말하는데 실제 준설량의 산정을 위해서 먼저 고려해야 할 것은 그 목적에 부합된 양을 대상량으로 해야 한다. 따라서, 준설이 주목적인 경우와 매립이 주목적인 경우로 나누어 검토한다.

### 3.2.1 준설 목적

준설자체가 주목적인 경우는 준설로 인하여 주요단면, 수심폭의 확장으로 필요수량이 확보되어야 하며 이 경우 여굴 및 유입토사에 대하여 검토되어야 한다.

#### 1) 여굴

준설을 하게 되면 해저의 오락수, 준설장비의 정밀도 등에 의하여 크고 작은 여굴이 발생하며, 이 때, 계획수심을 확보할 필요가 있는 경우와 소요수량을 확보할 필요가 있는 경우로 나누어 계획된다.

#### (1) 계획수심을 확보할 필요가 있는 경우

항로, 수로 등 소요수심을 확보하여야 될 필요가 있는 경우를 말하며, 이 경우는 항만 설계기준에 의거 초과 심도분을 가산하되 현장여건을 감안한 여굴계획을 반영해야 한다.

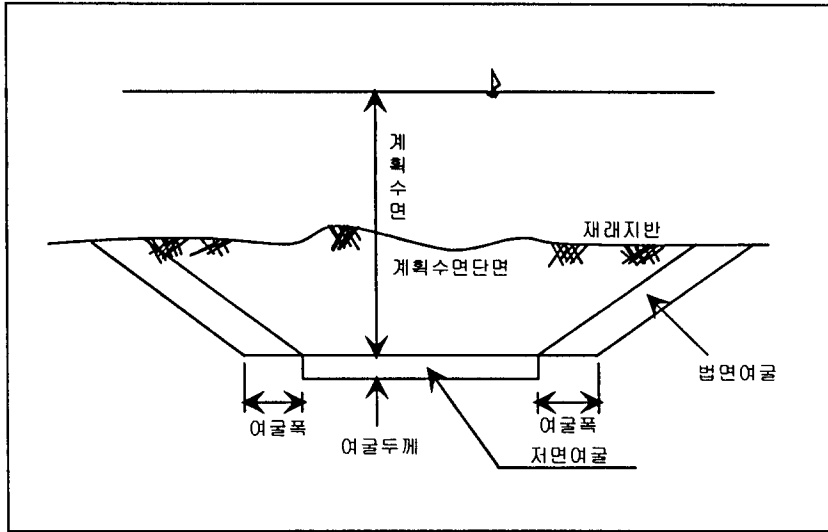


그림 2. 준설단면

일반토사의 여굴두께 및 폭에 대한 기준은 표 2와 같다.

표 2. 일반토사의 여굴두께 및 폭에 대한 기준

여굴두께(a)	여 굴 폭(b)	비 고
0.2~0.3(m)	3m	

(2) 소요수량을 확보할 필요가 있는 경우

소요수량을 확보할 목적으로 준설을 하는 경우 여굴에 대한 고려는 신중히 할 필요가 있다. 이 경우 설계기준에는 특별한 규정이 없으나 준설계획고의 허용오차를 뒀으로써 여굴의 반영으로 인한 공사비 증감을 억제해야 할 것이다.

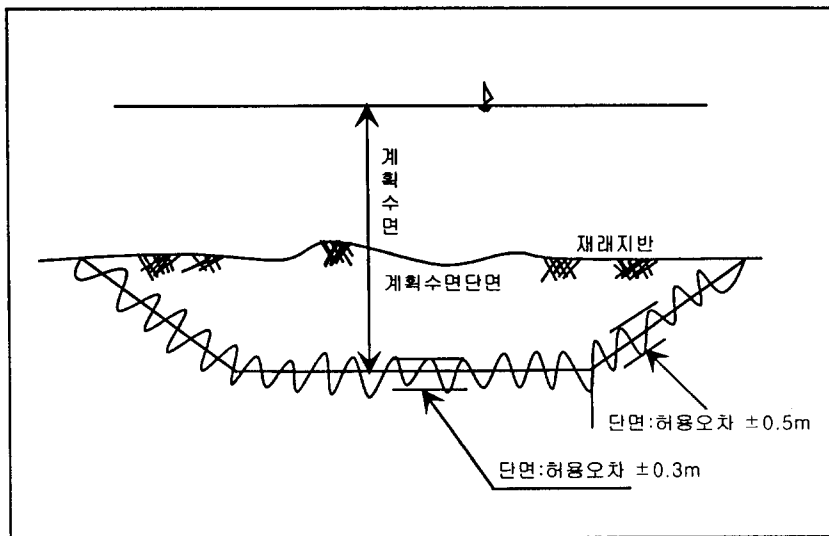


그림 3. 준설단면의 허용오차

### 3.2.2 매립목적

준설토로 저지대를 매립하여 계획된 부지 등을 확보하여야 하는 경우로서 준설토의 침하와 유보율에 의하여 계획량을 산출한다.

#### 1) 유보율의 검토

토질조건 및 준설방법에 따라 유보율은 크게 차이가 발생하게 되는데 준설토의 조건에 따른 유보율 계획기준은 표 3 및 4와 같다.

표 3. 토질별 유보율

토 질	유 보 율(%)	비 고
점토 및 점토질 실트	70이하	
모래질 실트	70-95	
자갈	95-100	

표 4. 입경별 유실율

입경(mm)	유실율(%)	비 고
1.2이상	없음	
1.2-0.6	5-8	
0.6-0.3	10-15	
0.3-0.15	20-27	
0.15-0.075	30-35	
0.075	30-100	

### 3.2.3 유보율의 제고

준설토에 실트질 이하의 미립질이 많이 함유된 경우 재유출량이 많아서 매립지의 계획성토물량에 큰 차질이 발생하게 된다. 배사관을 통하여 매립지에 압송된 준설토는 대체적으로 함수율이 10~15%정도이며 85~90%가 물이다. 따라서, 교란된 준설토를 침전시켜 유보율을 높이기 위해서는 여수토를 높게 하고 침사지 면적을 넓게 할 필요가 있다.

### 3.2.4 배사관의 설치

준설선에서 압입된 준설토를 매립지점까지 운송하게 되는 배사관의 규격선정은 준설선의 능력 및 작업효율과 밀접한 관계가 있다.

표 5. 표준 배사관의 조합 (일본준설매립협회)

준설선 규격	배사관(6m)	Floater(4.5m)	Rubber Joint	Floater 표준보유수량
E - 200PS	경 310mm	경 850mm	장 900mm	120m
500	410	850	900	150
750	460	950	1,000	250
1,000	560	1,000	1,000	300
1,200	560	1,000	1,200	300
1,500	610	1,100	1,200	300
2,000	660	1,200	1,400	400
3,000	710	1,300	1,500	400
D - 1.350	560	1,000	1,000	300
2,250	660	1,200	1,400	400
2,600	660	1,200	1,400	400
3,200	660	1,200	1,500	400
4,000	710	1,300	1,600	600
5,000	710	1,300	1,600	600
6,000	760	1,400	1,800	600
7,000	760	1,400	1,600	600
8,000	860	1,600	1,600	600
9,000	860	1,600	1,900	600

배사관은 연장에 따라 작업효율이 달라지므로 배사관 연장은 가급적 짧게, 직선으로 설치해야 한다. 또한, 해상관 설치를 위한 부합(Floater)은 준설토의 압송시 그 하중과 충격에 충분히 지탱하도록 설치하는데 배사관이 사형으로 설치되면 관이 뒤틀리게 된다.

### 3.2.5 환경관리

해상작업의 경우와 마찬가지로 육상작업시도 준설 후 발생된 탁류와 매립지에서 배출된 여수의 부유사로 인하여 담수호에 오탁수에 발생되며 따라서 환경에 대한 피해 저감대책이 필요하다. 일반적으로 오탁방지를 위해서 이동식 오탁방지막(Silt Protector)의 설치가 검토되어야 한다.



## 4. 국내의 준설물량 산정 사례

### 4.1 울촌산단 준설매립현장

#### 4.1.1 개요

울촌 제 1산단 조성공사는 전라남도 순천시, 여천군 및 광양시 일원의 해면을 매립하여 약 276만평의 단지를 조성하는 사업으로 울촌 산단 전면의 항로 준설시 발생하는 준설점토를 주 매립재료로 이용하여 부지를 조성하도록 계획하여 시공되었다.

울촌산단의 Containment Area는 대략  $1,500 \times 850\text{m}$  ( $1,275,000\text{m}^2$ )로 계획되었으며, 매립대상지역의 원지반 평균 Level은 EL(-)1.8m, 연약해성점토층 평균 두께는 10m, 매립단지 계획고는 EL(+ )4.4m이다. 작업 공기와 준설점토의 함수비 변화 등을 감안하여 단위 Containment Area에 대한 준설매립토의 방치기간을 약 22개월로 선정하였다. 준설매립공법을 설계하기 위한 일련의 과정은 그림 4와 같이 계획되었다. 세부적으로는 준설지역 및 매립 지역의 지반조사와 해성점토의 제반특성을 파악하기 위한 현장시험, 실내시험 및 침강, 자중압밀시험 등이 실시되었다.

준설시 높은 함수비를 지닌 해성점토가 일정한 기간동안 침강, 압밀이 진행된 후 계획지반고를 조성할 수 있는 물량으로 준설물량을 산정하였으며, 준설물량을 준설초기에 담아두기 위한 Containment Area가 설계되었다. 또한, 방치기간동안 준설점토의 침강, 자중압밀, 표면건조에 의한 건조층의 형성 및 준설점토에 의한 원지반 연약층의 압밀진행 등이 검토되었다.

준설선은 월 작업능력 약  $150\text{만m}^3$ 인 2만 마력급의 Cutter Suction Pump Dredger를 사용하였으며, Containment Dyke 축조재료는 인근에서 경제적인 토사를 얻을 수 없어 암석류(버럭+사석)을 이용하여 법면에 차수 매트를 포설하여 축조하였다.

#### 4.1.2 현장시험, 실내시험 및 침강, 압밀시험

현장시험의 경우 준설매립 지역에 따라 그 주안점을 달리 두어야 한다. 울촌 산단의 경우 준설지역의 지반은 준설물량 산정에 요구되는 재료별 분포 상황, 매립지역과 인접한 준설지역의 준설시 Containment Dyke의 안정에 영향을 미칠 수 있는 원지반 강도 측정에 주안점을 두었으며, 매립지역의 지반은 Containment Dyke의 축조 계획선에 따른 지반강도, 전반적인 연약층의 분포양상, 하부배수조건의 판정 및 압밀 특성과 강도 특성 조사에 주안점을 두어 현장시험을 실시하였다.

실내시험은 준설토의 침강 및 압밀 특성을 파악하여 실제 준설매립지반의 체적 변화율을 예측하고 Containment Area 설계, Sediment의 장기 저장용량 산정 등에 필요한 자료를 구하는 것이 목적이다. 울촌 산단의 경우 이러한 자료를 구하기 위하여 물성시험과 역학시험, 침강시험을 실시하였다. 침강시험은 하부배수조건에 따른 시험과 초기농도 변화에 따른 시험을 실시하였으며,  $60 \sim 200\text{g/l}$ 의 초기 농도에 대하여 시간-침하량 관계 곡선을 작성하여 Zone Settling구간의 침강속도를 도시하였다.

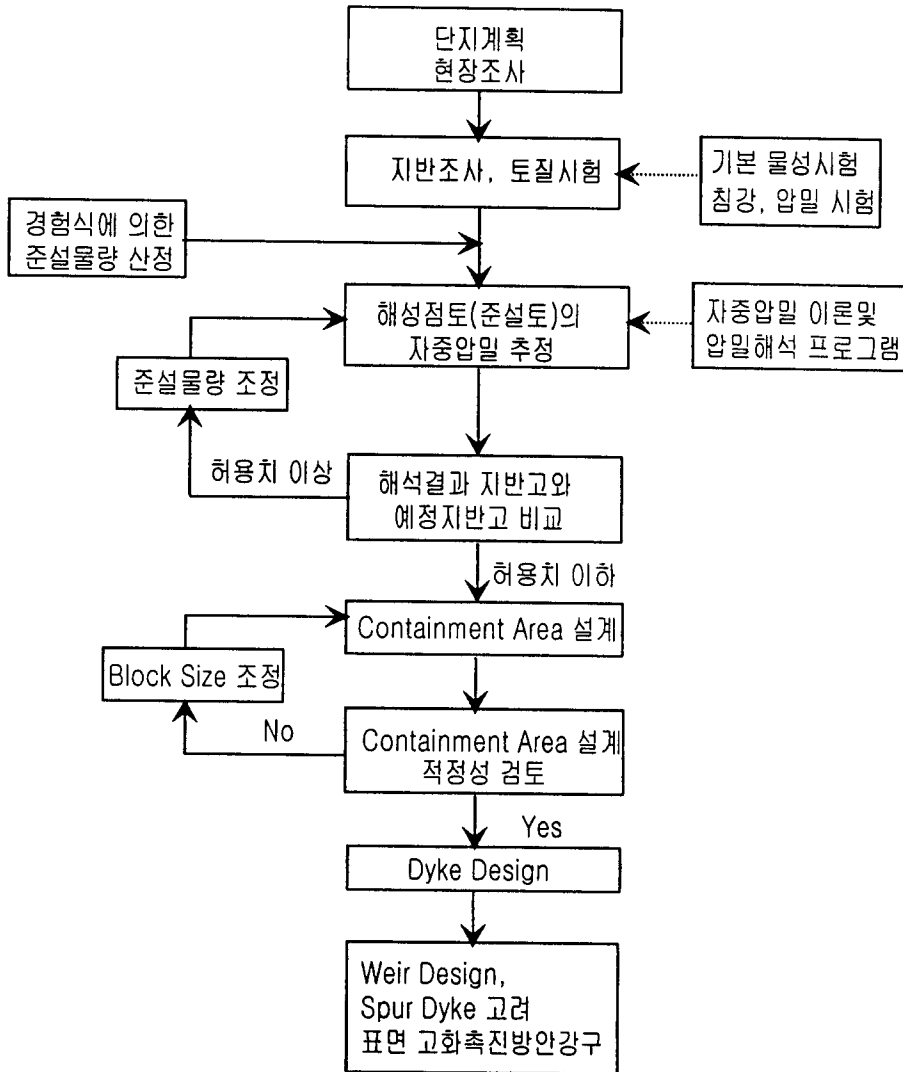


그림 4. 준설패립공법 흐름도(울촌공단)

#### 4.1.3 Containment Area 설계

##### 1) 준설패립량(Solid Height, $H_s$ ) 산정

울촌산단의 경우 준설패립토를 1년 이상 방치하면 표면에 건조증발에 의한 건조층(Desiccation Crust)이 형성되고, 그 하부에는 연약한 상태의 준설패립층이 존재하므로 이를 구분하여 준설패립량을 산정하였다. 또한, 인접한 광양항 컨테이너 부두공사 현장에서의 자료와 미공병단 및 일본의 준설패립 투기 현장에서 제시한 시간 경과에 따른 준설패립의 함수비 변화 경험식등을 참고하여 초기 준설패립량을 산정하였다.

일반적으로 건조층은 자연방치시 최대 30cm정도 형성된다고 알려져 있지만 울촌산단에서는 부지이용 목적을 위해 건조층의 두께를 증가시켰으며 PMT(Progressive Trenching Method)공법을 적용하여 최대 0.6m까지 건조층이 형성되고, 그 하부에는 고탍수비의 지

반이 형성되어 있는 것으로 검토하였다. 준설매립토 하중에 의한 방치기간중 원지반 연약층의 압밀량은 건조층 하부에 지하수위가 형성되어 있다는 가정을 하여 산정하였으며, 이에 추가 소요되는 준설물량을 산정하여 전체준설물량을 산정하였다.

## 2) Containment Dyke 높이 결정

Containment Dyke의 높이를 결정하기 위해서는 준설종료시점의 준설매립토 농도와 높이를 산정하여야 한다. 단위 Containment Area에 계획된 준설물량을 준설하는데 수개월이 소요되고, 준설 초기에 투기한 준설점토는 이미 침강이 완료되어 자중압밀이 진행중에 있으며, 준설 말기에 투기한 준설점토는 침강 진행중에 있다. 따라서, 준설종료시점에서의 농도를 결정하는 것보다 준설매립토 전 깊이에 걸친 평균 농도를 선정하는 것이 좀 더 합리적이고, 타당하다고 볼 수 있다.

울촌산단의 경우 초기 농도 145g/l에 대한 침강시험에서 경과시간에 대한 농도 변화를 측정하여 준설 공기의 1/2에 해당하는 시점의 농도를 결정하였으며, 이를 준설매립을 종료한 시점의 준설매립층 평균 농도(Design Concentration,  $C_d$ )로 취하였다. 준설종료 시점의 준설매립토 높이와 소요 Containment Dyke의 높이는 산정식에 의하여 결정하였다. 투기된 준설점토가 토출구로부터 여수토로 흘러가는 동안 충분한 침강이 진행되고 해수만을 월류시키기 위한 최소 소요면적을 확보했는지 여부 역시 산정식을 이용하여 검토하였다.

## 3) Containment Area 적정성 판단

울촌산단의 Containment Area는 대략적으로 1,275,000m<sup>2</sup>로 계획되었으며, 이에 대한 적정성 여부는 다음과 같은 절차에 의하여 판단하였다. 준설기간에 대한 준설물량의 비로 유입량을 결정한 후 산정식을 이용하여 이론적인 Containment Area를 계산한다.

산정식으로 결정한 이론적인 면적은 실내 침강시험에서와 Containment Area 내에서 침강 거동의 차이점 및 면적의 비효율성과 공사 경험 등에 의한 증가계수를 사용하여 조정하였다. 울촌산단의 경우 구획한 단위 Containment Area는 설계면적의 약 2배에 해당하여 준설토의 침강이 충분하게 발생될 것으로 검토되었다.

## 4) Containment Area 형상 변화

도로 및 호안계획 등에 의하여 미리 결정된 Containment Area가 산정식에 의하여 계산된 면적보다 작은 경우 준설점토가 완전히 침강하지 못하고 월류하여 유보율이 떨어지는 현상이 발생할 수 있다. 울촌산단의 경우 계획된 Containment Area가 계산된 면적보다 크므로 Containment Area 단면 형상 변화를 고려하지 않았다.

## 4.2 송도 매립지 공유수면 준설매립현장

### 4.2.1 개요

송도 매립지 공유수면 준설매립현장은 총 면적 18.5km<sup>2</sup>를 5개 공구로 분할하여 부지를 조성하는 대규모 매립공사로 송도 매립지 전면 해상의 준설점토를 이용하여 준설점토 배송 거리, 준설점토 토성 등의 경제성을 감안하여 시공되었다.

송도 매립지 현장의 Containment Area는 대략 46,240,000m<sup>2</sup>으로 계획되었으며, 예상준설량은 187,000,000m<sup>3</sup>으로 계획되었다. 호안부 매립고는 EL(+) 5.4m, 매립 후 표토에 대해서 녹지구역은 산토 1.0m, 일반구역은 산토 0.2m로 계획되었다.

준설점토 매립장비는 펌프 준설선을 사용하여 준설토 투기시 토출구의 위치를 토성별로 배치하여 일부 지역에 점성토가 집중 분포되지 않도록 하였으며, 여수토 위치를 각 공구별로 녹지구역에 설치하여 연약지반 발생구역에 대해서 연약지반 개량공사를 시행하였다. 준설점토 정지 작업은 도저를 사용하도록 계획되었다.

여수토는 계획지점의 간만조차가 크게 예상되어 지반의 세굴을 방지할 수 있도록 맨홀식으로 계획하여 내측 수위조절이 용이하도록 계획되었다. 또한, 준설점토의 오탁을 방지하기 위하여 오탁방지막이 시공되었으며, 해당 수역에서 외력에 의한 유동을 방지하기 위하여 해저면에 앵커를 배치하여 캔버스(Canvas) 하부와 연결하여 고정시켰다. 준설매립공법을 설계하기 위한 일련의 과정은 그림 5와 같다.

### 4.2.2 현장시험 및 실내시험

송도 매립지의 경우 매립지 원지반에 대하여 토성 및 역학 시험과 SPT 시험을 실시하였으며, 준설 지역에 대하여 토성 및 역학 시험을 실시하였다. 매립지 원지반에 대한 조사는 매립시 지반지지력과 매립 완료 후 매립부지의 침하 예측과 밀접한 관계가 있어 시행되었다. 또한, 준설 지역에 대한 토성 및 역학 시험은 준설 매립 후 일반 매립지 구역과 여수토 전면 구역의 토성 변화 예측 및 유보율과 매립토 자체 수축율 등을 산정하기 위하여 실시되었다.

준설 지역에 대한 공구별 토성 및 입도분포는 다소 차이가 있으나 그 차이가 거의 없어 입도분포의 평균치, 즉, 모래 35%, 실트 54%, 점토 11%를 준설토의 토성으로 적용하였다. 통일 분류법에 의하면 SM, ML이 주로 분포되어 있으며 CL인 곳도 존재하는 것으로 파악되었다.

### 4.2.3 준설물량 산정

#### 1) 유보율 결정

송도 매립지 현장에서 유보율 결정은 표 3과 4의 시공실적에 의한 토질별 유보율과 입경별 유실율에 근거하여 실시하였다. 입경별 유실율은 Filter재를 사용한 제체를 통한 유실율은 0인점을 감안하여 입경별 유실율의 1/2을 적용하여 유보율로 계산하였으며, 이 값과 토질별 유보율에 대하여 그 평균치를 유보율로 적용하였다.

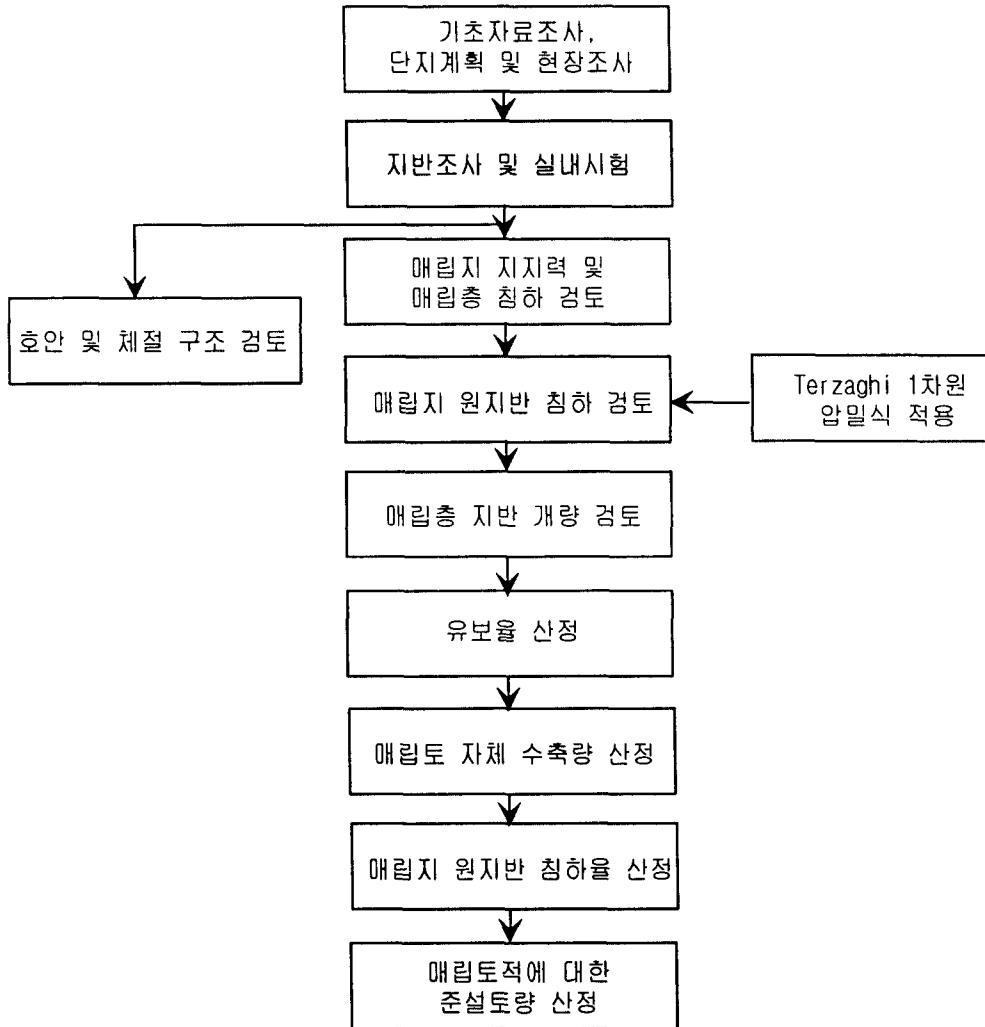


그림 5. 준설매립공법 흐름도(송도 매립지 현장)

## 2) 매립토 자체 수축량 산정

매립토자체 수축량은 침하량 계산결과(즉시침하량+압밀침하량)와 시공사례를 비교 검토하여 산정하였다.

매립기간중 매립토의 자체수축에 의한 침하는 일반적으로 사질토에 대하여 층 두께의 5%이하, 점성토에 대하여 층 두께의 20% 이하, 점성토와 사질토 혼합일 경우에는 층 두께의 10~15%정도를 적용한다. 송도 매립지 현장의 경우 점토와 사질토가 혼합된 지역으로 자체수축은 층두께의 10~15%정도를 적용하였다. 또한, 매립토층의 침하량을 계산하여 산토를 제외한 매립층 두께에 대한 침하량, 즉 침하율을 결정하였다.

송도 매립지 현장의 경우 위의 두 방법에 의해 얻은 값에 대하여 그 평균치를 매립토 자체 수축량으로 산정하였다.

### 3) 매립지 원지반 침하율 산정

매립지 원지반에 대하여 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의한 침하량을 계산하여 매립지 원지반 두께에 대한 침하량, 즉, 침하율을 산정하였다. 압밀구간은 각 공구 매립 후 육상기 반시설공사가 시작되는 시점에서 3년이내를 기준으로 하여 침하량을 계산하여 침하율을 산정하였다. 침하율은 해저 원지반 두께가 상이한 점을 고려하여 각 공구별 침하율을 산정하였다.

### 4) 매립토 함율을 결정

위와 같이 유보율, 매립토 자체의 수축량, 매립지 원지반의 침하율을 결정하여 준설매립 토량 산정식에 의하여 매립토적을 기준으로 준설매립토량을 결정하였다.

$$V = V_0 / P$$

여기서, V : 매립시공토량 ( $m^3$ )

$V_0$  : 매립토량으로 (매립토적/자체 수축율×침하율)로 결정

P : 매립토사의 평균유보율

위 식에서 각 항을 매립토적에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{매립시공토량/매립토적} = \text{침하율/자체 수축율} / \text{유보율}$$

송도 매립지 현장의 경우 매립 토적에 대한 매립시공토량은 133%로 시공되어야 하는 것으로 나타났다.

## 5. 국내의 체적비 산정방법 및 고찰

### 5.1 개요

국내매립 현장에서 자중압밀 종료 후의 체적비 변화를 구하기 위하여 주로 Yano (矢野弘一郎)가 제시한 경험적인 방법을 사용하고 있다. Yano는 현장 준설 매립지반의 시간경과에 따른 자중압밀 침하량을 예측하기 위한 경험적인 방법을 제시하였다.

실내에서 초기 농도(또는 함수비) 및 초기 높이를 변화시키면서 침강-압밀실험을 수행하여 침강압밀 곡선을 구할 수 있다. 시간경과에 따른 침강곡선을 대수눈금으로 도시하여 침강속도가 일정하게 나타나는 자중압밀 시점과 종점을 구할 수 있다. log함수로 표현되는 시간경과에 따른 계면고의 변화를 표현하는 침강압밀계수, 즉, 대수눈금에서 자중압밀 시점과 종점의 기울기를 구하므로써 현장조건의 침하량을 예측할 수 있다.

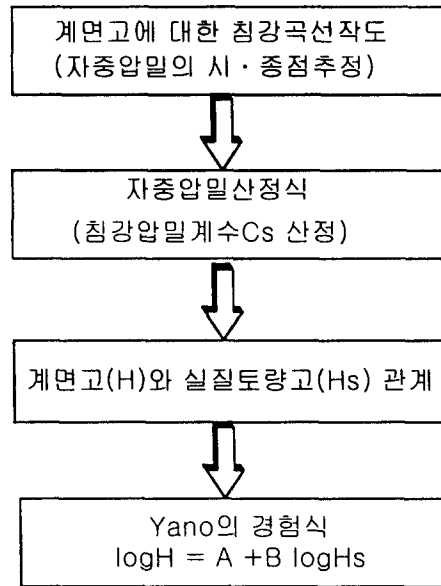


그림 6. 체적비 산정방법

## 5.2 자중압밀 시·종점 추정

압밀의 구분은 유효응력의 존재 유무이지만 실제로 이것을 측정하기는 매우 어려우므로 침강곡선에서 속도의 변화를 보고 간접적으로 구할 수 있다. 압밀의 시작점은 학자마다 다소 차이가 있지만 일반적으로 침강곡선에서 침강속도가 느려지는 변곡점으로 보고 있다.

- ① Kynch : 현탁액 상부에서 침강속도가 변곡될 때 자중압밀시작.
- ② McRoberts & Nixon : 경계면이 생긴 후 일정속도로 침하.
- ③ Monte & Kriezek : 응력이 형성되는 한계유동상태(Fluid Limit)부터 압밀.
- ④ Lin & Lohnes : 유효응력이 발생하는 시점의 농도(한계농도).

자중압밀이 침강곡선의 변곡점에서부터 시작된다고 가정하면 유효상재하중은 위에 존재하는 토립자 자체의 수중단위중량인 자중이 될 것이다. 이 하중이 유효응력으로 작용해서 자중압밀이 시작된다. 그림 7에서부터 그림 10은 초기함수비가 각각 300, 400, 700, 1000%인 시료에 대하여 시료 높이를 변화시키면서 시간-침하량을 측정한 결과이다. 자중압밀 시점,  $t_0$ 와 자중압밀 종점,  $t_{100}$ 은 그림에 도시된 바와 같다.

## 5.3 체적비 산정

일반적으로 준설된 토립자들의 침강과 압밀의 구분은 침강곡선에서 속도의 변화를 보고 간접적으로 판단하는데, 침강속도가 느려지는 변곡점을 자중압밀 시작점으로 추정한다.

Yano의 방법이 이에 속한다.

Been과 Sills은 자중압밀이 시작하는 점을 명확하게 정의하지 않았지만, Lin과 Lohnes는 Been과 Sills의 이론을 도입하면서 압밀이 침강이 완료되기 전에 이미 하부에서 진행되고 있다는 점에 착안하여 투기한 시료의 입자가 연성의 3차원 격자 구조를 이루고, 그 농도가 한계 농도에 도달하여 계면이 형성되는 시점에서 자중압밀이 시작한다고 정의하였다.

시료의 초기 농도가 큰 경우 침강시험 초기에 시료 입자가 플록(floc)을 형성하여 침강하여 불룩한 모양을 갖는 곡선이 형성되며, 이 점을 자중압밀 시작점으로 보았다. 시료의 초기 농도가 작은 경우 침강시험 초기에 시료 입자가 플록을 형성하여 침강하기보다는 개개의 형태로 침강하여 불룩한 모양의 곡선이 뚜렷하게 형성되지 않아 2차 변곡점이 발생하는 부분을 자중압밀 시작점으로 보았다.

그림 7~10을 통하여 초기 함수비 400%와 700%를 경계로 Lin과 Lohnes가 정의한 자중압밀 시작점이 뚜렷하게 구분되는 경향을 보였다.

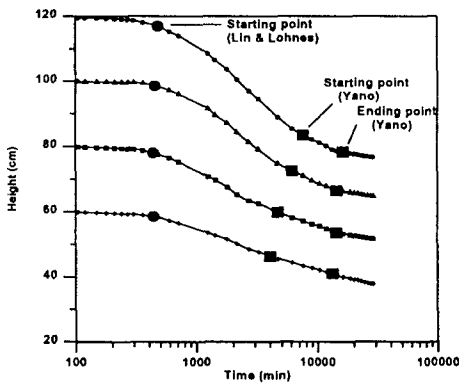


그림 7. 시간에 따른 계면고 곡선(300%)

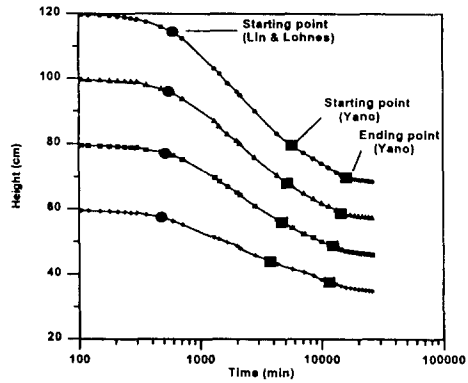


그림 8. 시간에 따른 계면고 곡선(400%)

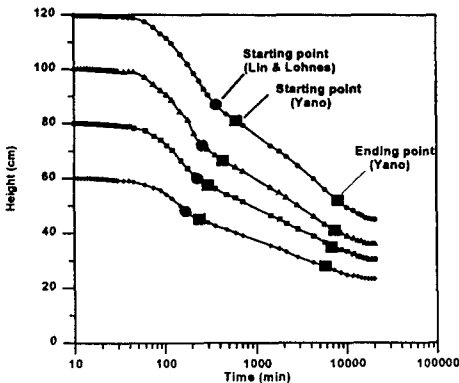


그림 9. 시간에 따른 계면고 곡선(700%)

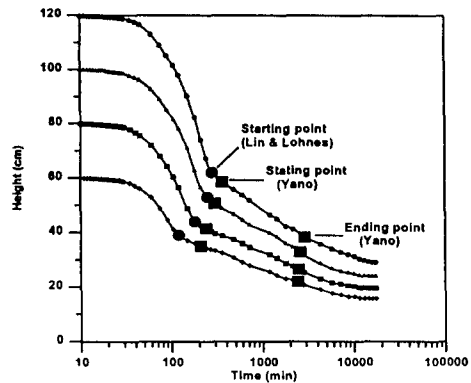


그림 10. 시간에 따른 계면고 곡선(1000%)

그림 11은 실질토랑고와 계면고의 관계를 나타낸 것으로 자중압밀하에서 임의의 압밀도에 대하여 동일한 직선관계에 있음을 보여준다.



그러나, 시간  $t_0$ 에서의 직선의 기울기가  $t_{100}$ 의 기울기보다 약간 작게 나타나는 경향을 보여 H가 큰 경우  $t_0$ 의 직선과  $t_{100}$ 의 직선이 교차하게 되는 불합리한 점을 가지고 있다. 이는  $t_0$ 의 직선이 침강퇴적과정에 대해 퇴적이고 높이의 상승에 따라 하층에서 압밀이 진행하고 있음을 의미한다. 즉, 계면 침강현상에서 압밀과정에 들어간 시간  $t_0$ 에서는 퇴적토의 평균 압밀도가 0인 것을 의미하지는 않는다. 또한, 초기 함수비 300%, 400%에 대한 자중압밀 시점에서의 자중압밀 직선식은 700%, 1000%의 자중압밀 종점의 자중압밀 직선식보다 작은 절편을 갖는 것으로 나타나 일반적인 자중압밀 시·종점과는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 반하여 Lin과 Lohnes의 방법에 의한 자중압밀 직선식은 일반적인 경향을 나타내었지만 그 기울기가 크게 나타나는 경향을 보였다.

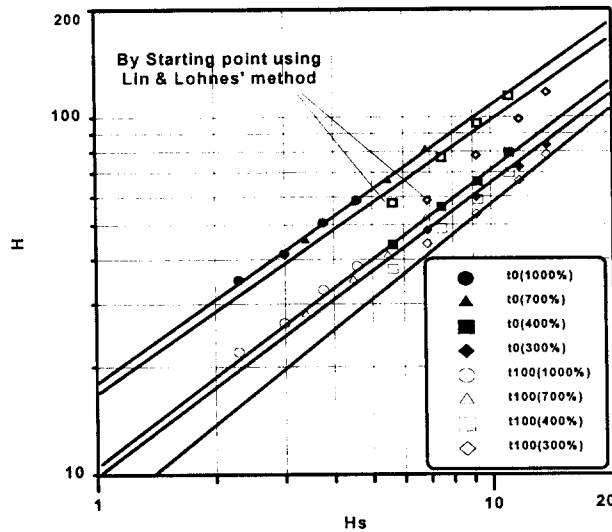


그림 11. 실질토량고와 계면고 관계

#### 5.4 체적비 산정 고찰

준설 점토에 대한 자중압밀 시험을 실시하여 Lin과 Lohnes 방법과 Yano 방법을 통한 자중압밀 시·종점에 대한 비교 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 자중압밀 시점에 대하여 Lin과 Lohnes와 Yano 방법은 700%, 1000%와 같은 고 함수비에서는 대체적으로 일치하는 것으로 나타났지만, 300%, 400%와 같이 저 함수비에서는 일치하지 않는 것으로 나타났다.
- 2) 함수비가 작을수록 플록을 형성하여 침강하고, 흩 입자가 차지하는 체적이 크게 때문에 자중압밀 시점에서부터 종점까지 도달하는 시간은 더 소요된다. 저 함수비에서 Yano 방법으로 추정된 자중압밀 구간은 반대 현상이 나타나 Lin과 Lohnes 방법으로 자중압밀 시점을 추정하는 더 타당한 것으로 나타났다.
- 3) 저 함수비에서는 Lin과 Lohnes 방법으로 추정된 자중압밀 시점을 적용하면 자중압밀 직선식의 기울기가 크게 산정되어 체적비에 영향을 끼치는데, 이는 시료 높이에 따라

동일한 지점에서 자중압밀 시점이 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 향후 저함수비에서 적절한 체적비를 산정하기 위한 자중압밀 시점에 대한 연구가 필요하다고 본다.

5.4.1 국내 준설매립 현장의 토량변화율 적용에

표 6. 울촌 제 1지방 공업단지 조성사업을 위한 토질실험자료

구분	원지반	준설매립중	준설매립직후	방치후	장기적
함수비(%)	79.1	1.000	145	100	79.1
간극비	2.1	26.5	3.8	2.65	2.1
부피비	1	8.87	1.55	1.18	1
비고	비중 2.65			방치기간 22개월	원지반 함수비

표 7. 광양항 컨테이너부두 제 1단계 체적비

조사기간	토량변화율	투기상태
93.7	1.40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 준설시행시 A,B 매립완료 C 투기장 투기</li> </ul>
	1.26	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6개월 경과시</li> </ul>

표 8. 가덕도(경부 준설토 투기장) 체적비

함수비 기간	500%	516%	608%	700%	800%	900%	비고
투기완료후 0.0년	1.33	1.35	1.44	1.54	1.65	1.76	매립직후
1.0	1.27	1.28	1.36	1.42	1.50	1.58	
2.0	1.24	1.25	1.31	1.36	1.43	1.49	
3.0	1.21	1.22	1.28	1.32	1.38	1.44	

5.4.2 기타

- 마산항 정화 사업 기본 및 실시설계 : 1.40 적용
- 광양항 묘도 준설토 투기장 가호안 실시설계 : 1.30 적용
- 묘도 준설토 투기장 계획의 준설토 투기기간이 약 3년정도 예상되며 투기직후와 3년 경과시 토량 변화율의 평균치인 1.30을 적용하였다.

### 5.4.3 체적비 산정시 유의사항

표 9는 침강압밀 실험을 통하여 Yano방법으로 체적비를 산정한 일례이다. 단계별 준설 매립종료 후 경과시간에 대하여 계면고의 변화를 계산할 수 있으며, 이에 대응하는 간극비, 함수비 및 체적비를 구할 수 있다.

체적비는 원지반 체적에 대한 준설매립토의 체적비로 나타낼 수 있으며, 자중압밀이 완료하였을 때는 준설매립지반의 간극비 및 함수비가 원지반과 거의 같아지므로 체적비는 1이 된다. 표 9에서 단계별 준설매립 종료 후 체적비와 비교하여 2년 후에 체적비가 1 이하의 값을 갖는 것으로 나타나 원지반보다 더 작은 간극비와 함수비를 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 실내실험 결과를 이용하여 Yano 방법에 의한 체적비를 산정하고자 하는 경우 표 9와 같은 결과가 도출될 수 있으므로 Yano 방법의 자중압밀 직선식에 대한 보정이 필요하며, 필히 인근 현장의 체적비 산정 결과와 비교 분석하여 준설매립지반의 체적비를 적정하게 산정하여야 한다.

표 9. 체적비 산정 예(00 현장)

침강시간 (일)	투입종료후의 경과시간(일)	logH	계면고 (m)	간극비 (e)	함수비 (w)	체적비
98	1	1.001	10	2.50	92	1.10
128	30	0.993	9.84	2.45	90	1.09
278	180	0.971	9.35	2.28	84	1.03
463	365	0.957	9.06	2.17	80	1.00
828	730	0.941	8.73	2.06	76	0.96
1923	1825	0.917	8.26	1.87	69	0.90
3748	3650	0.898	7.91	1.77	65	0.87

## 5.5 비교 고찰

앞에서도 살펴본 바와 같이 자중압밀의 시작점에 대한 의견은 다양하다. 본 Yano 방법에서도 자중압밀의 시·종점의 잘못된 선정은 그 때의 간극비를 잘못 산정하게 되어 체적비의 산정에 영향을 미친다. 현재 자중압밀 시·종점에 대한 여러 학자들의 견해는 다음과 같다.

### 5.5.1 Lin & Lohnes(1984)

자중압밀은 침강실험에서 계면이 생기고 흙입자들이 3차원적인 격자를 형성함으로써 슬러리가 한계농도에 도달했을 때 시작한다. 따라서 초기농도가 한계농도보다 작은 고함수비에서는 한계농도에 도달했을 때 즉, 2차변곡이 생기는 지점을 자중압밀 시점으로 선정하였으며, 저함수비인 경우는 초기농도가 한계농도보다 크기 때문에 계면이 형성되는 즉시 자중압밀이 시작된다고 하였다. 자중압밀시점을  $\sqrt{t} - H$  곡선에서 결정하였다.

### 5.5.2 정인준 & 유건선 (1979)

자중압밀 실험을 통하여 도시한 침강곡선을 3단계의 형태로 구분하였다. 제 1단계는 플록이 aggregate를 형성하면서 침강하는 침강속도가 느린 단계이고, 제2단계는 aggregate 혹은 aggregate-network가 침강하는 속도가 빠른 단계이고, 제3단계는 침강현상이 완료되고 자중에 의해 압밀이 일어나는 단계로 정의하였다.

자중압밀은 2단계와 3단계에서의 접선의 교점에 해당하는 시간에서 시작한다고 하였다. 자중압밀 시점을  $\log t - H$  또는  $\log t - f(=1+e)$  곡선에서 결정하였다.

### 5.5.3 김수삼(1987)

시간-침강 곡선에서 상·하부 곡선에 접선을 그리고 그 만나는 점을 구하면 이 점이 침강의 종료시점이며, 이 종료점이 자중압밀 시점으로 추정할 수 있다고 하였다.

### 5.5.4 Yano(1984)

침강압밀계수를 산정하기 위하여  $\log t - \log H$  곡선을 작도하여 일직선이 되는 부분을 자중압밀 시점으로 결정하였으며, 일직선이 끝나는 부분을 자중압밀 종점으로 결정하였다.

위와 같이 자중압밀의 시·종점에 대한 몇 가지 견해를 살펴본 바와 같이 서로 다른 견해를 나타내고 있지만, 자중에 의한 퇴적층의 압밀이 침강개시 직후부터 토립자가 하단에 쌓이면서 부분적으로 이미 진행되고 있기 때문에 침강종료시점을 자중압밀의 개시점으로 보기에 어렵다. 따라서, 자중압밀의 진행을 확인하기 위해서는 저응력하에서 유효응력의 발생을 확인해야 한다. 그러나, 계면의 침강과 퇴적층의 두께가 시간에 따라 변하므로 유효응력의 존재를 확인하기가 상당히 어려우므로 이를 위해 많은 연구와 실험이 필요하다.

## 6. 준설매립지반 개량공법

### 6.1 개 요

해안을 매립하여 부지를 조성하는 공사에 있어서 일반적으로 이용되는 방법은 방조제에 의해 일정범위의 공유수면을 체절하여 생기는 내수면을 준설매립하는 방법이다. 여기서, 준설매립이란 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 섞여진 상태로 배송관을 통해 준설대상지역으로 이송하여 토립자의 침강 및 물의 배수를 유도함으로써 내수면을 육상화시키는 공법이다. 이는 육상토로 매립하는 경우에 육상토가 양적으로 부족하거나 이동 거리가 길어 경제적으로 합당하지 못한 경우가 대부분이기 때문에 매립대상지역 인접 해저의 토사를 이용하는 방법이다. 점성토를 준설매립 재료로 사용할 경우 흙 입자의 침강소요 시간이 길어지게 되어 준설작업에 소요되는 시간이 길어지게 되며, 침강형성지반 또한 매우 연약한 상태가 되어 지지력 및 침하 등 공학적인 특성이 매우 불리한 지반이 형성된다.

따라서, 매립대상 지반이 광대하고 매립토량이 많은 공사에 있어서는 지반개량의 필요성 여부의 판단 및 적절한 공법선정에 유의하여 합리적이고 경제적인 단지조성공사가 될 수 있도록 하여야 한다.

## 6.2 개량공법 선정 및 공법별 적용성

지반 개량방법의 결정과 지반조사를 하기 위한 기본조건에 대한 개략적인 흐름도는 그림 12와 같으며 이는 지반개량의 목적, 공법 적용성간의 상관관계를 나타낸 것이다. 매립완료 지반에서 지반처리가 필요한 경우가 많은데 적합한 지반개량공법은 토질상태, 시공현장조건, 경제성과 같은 여러 가지 조건에 따라 결정된다. 지반개량의 목적은 강도가 부족한 흙이나 부적절한 지반에 안정성을 높이고자 하는 것으로 지반개량의 소기의 목적을 달성하기 위해서는 조밀화, 고결화, 압밀에 의한 배수, 보강, 치환과 같은 기술적인 특성을 고려해야 한다. 특히, 매립완료지반의 경우 입경에 따라 분급되어 지반이 형성될 가능성이 큰 만큼 해당 입경에 따른 적절한 지반개량공법의 선정이 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

보강공법은 과거 수년간 지반개량 분야에서 지속적으로 발전되었으며, 특히, 점성토에서 입상토까지 다양한 토질의 종류에 적용할 수 있다. 예를 들어, 토목섬유는 연약점토와 충적토 지반 개량에 효과적이며 그라우트 되지 않는 토질에서는 마이크로 파일링 또는 네일링 등이 효과적인 방법이다. 혼합 그라우팅공법은 경화작용으로 토질의 점착력과 강도를 증가시키는 방법으로 흙 입자를 결합시키고, 변형에 저항하기 위해 간극이 붕쇄되어 침식에 저항하고, 침투수가 차단됨으로써 토체내의 물의 흐름과 팽팽 문제를 어느 정도 감소시킬 수 있다.

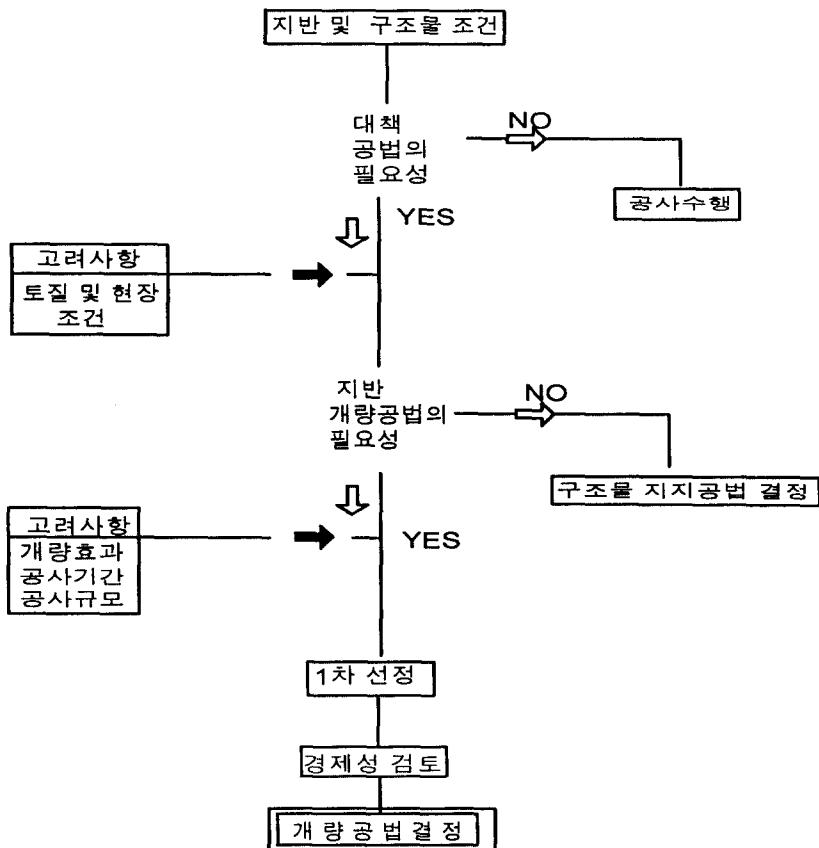


그림 12. 지반개량공법선정 흐름도

다짐공법은 밀도를 증가시키기 위해 지반에 에너지를 가하는 것으로서 이러한 공법은 실트질흙, 모래질흙, 입상토와 같은 투수성이 좋은 지반에 적합하다.

이 공법을 입상토에 적용할 경우 입자간의 조밀화에 따른 침하와 간극이 감소되고 입자들 간 마찰력을 증대시킨다. 탈수공법은 간극의 체적감소를 유도하여 간극으로부터 물을 분산하기 위해 높은 압력을 적용하여 배수시켜 지반의 압밀을 촉진시키는 공법이다. 높은 함수비와 유기질 성분을 지닌 두꺼운 연약 점토층에 적합하다. 또한, 이 방법은 지반개량을 하는데 소요되는 시간을 줄이기 위하여 샌드드레인, 페이퍼드레인과 같은 수직 배수장치와 함께 사용되어지면 더욱 효과적이다.

### 6.3 매립지반 개량공법의 선정과 종류 및 특성

매립지반의 개량공법 선정시에는 다음과 같은 사항을 고려해야 하며 선정을 위해서는 매립완료지반에 대한 지반 조사등 정확하고 객관적인 자료를 선정의 근거로 삼아야 할 것이다.

#### 1) 적용 가능한 지반의 종류

모래질 흙에서는 표면다짐, 펌핑에 의한 탈수, 폭파, 진동다짐, Grouting 공법 등이 적합하며, 점토질 흙에서는 표면건조, 다짐말뚝, 진동치환, 쇄석말뚝, Surcharge 공법, 선행재하공법 등이 적합하다. 또한, 실트질 흙에서는 전기삼투, Chemical Grouting, 침투압밀 등의 공법이 사용될 수 있다.

#### 2) 최대처리 유효깊이

Grouting을 이용한 지반개량은 처리깊이에 관계없이 적용이 가능하나 진동다짐은 30m, 폭파공법은 30m 이상, 선행재하 및 선행압밀 공법은 15~30m, 다짐말뚝, 혼합타설 말뚝 공법은 20m이상, 진동탐침 및 진동치환쇄석 등은 20m, 펌핑에 의한 탈수공법은 7m, 표면건조공법은 1~7m정도의 지반개량이 가능하다.

#### 3) 사용 재료

공통적으로 많이 사용되는 재료는 자갈, 쇄석, 입상토, 물 등이며 폭약 및 Hole-Casing은 폭파공법, 성토재 아래 지하배수 시스템은 침투압밀공법, 알루미늄 및 웰 포인트 등은 전기삼투공법 등에 주로 사용된다.

#### 4) 활용장비

믹서, 탱크, 호스, 노즐, 제트 등은 그라우팅 관련 개량공법에 많이 사용된다. 로올러, 불도우저 등은 표면 다짐공법, 크레인은 진동다짐공법, 진동배수장치 및 침하계 등은 선행재하공법, 침하계 및 피조미터 등은 Surcharge 공법 등에 사용된다.

#### 5) 개량지반의 효과

일반적으로 지반개량을 함으로써 밀도 및 강도증가, 압축성 및 함수비 감소 등의 공통적인 효과를 얻을 수 있다. 또한, Chemical Grouting, 특수 그라우팅 등을 사용함으로써 상기의 효과외에 액상화 방지효과를 동시에 기대할 수 있으며, 동다짐, 진동다짐, 다짐말뚝, 표면다짐 등의 양호한 균등성을 확보할 수 있다.

#### 6) 공법별 장·단점

시공이 간단한 공법으로는 표면다짐, 진동탐침, 동다짐, 선행재하공법 등이 대표적이다. 이들 공법중 진동탐침공법은 견고한 지반에서는 관입이 곤란하며, 표면 다짐의 경우 건조상태에서만 작업이 가능하다. 동다짐 공법은 처리면적이 대규모일 경우 적합하고 선행재하공법은 확고한 이론이 정립된 반면 처리시간이 길다. 성토재하가 불필요한 공법으로는 전기침투, 침투압밀공법 등을 적용할 수 있다.

#### 7) 공비

현장여건에 따라 단적으로 평가하기는 어려우나, 일반적으로 단가가 높은 공법들로는 Grouting, 전기-삼투, 혼합타설말뚝 등이 있으며, 저렴한 공법으로는 표면다짐, 진동다짐, 선행재하공법 등이 있다. 진동치환 및 모래기동, 다짐말뚝공법 등은 현장의 제반 여건에 따라 공사 단가에 상당한 차이가 있다.

#### 8) 유의사항

매립완료지반의 지반개량공법 선정은 지반조사 단계에서 그 지반조사 결과만을 가지고 판단하기 어려운 사항이다. 이에 대한 판단을 위해서는 매립이후 지반상태에 대한 정보가 제공되어야 하는데, 현 상태에서 매립이후 지반의 구성 및 특성을 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 준설매립 지반에 대한 개량공법의 선정 및 설계는 준설매립 이후 조성된 지반에 대하여 별도의 심층적인 지반조사를 수행하여 그 결과를 토대로 실시하여야 한다.

### 6.4 준설매립에 의한 부지조성 관련 문제점 고찰

#### 6.4.1 준설매립 지반내에서의 터파기 안정성 확보 및 지반팽창 방지

준설매립에 의하여 형성된 지반은 일반적으로 퇴적형성 연대가 짧기 때문에 지반이 덜 고결되어 강도가 약하고, 준설과정에서 입자가 분급되어 같은 크기의 입자끼리 한 곳에 모이려는 경향을 가지고 있다. 특히, 토출구로부터 거리가 멀어짐에 따라 세립토가 집적되어 부분적인 초연약지반이 형성되기도 한다. 이러한 지반에서 터파기를 실시하는 경우 지반 자체의 강도부족으로 터파기 사면의 유동 및 저면 지반의 팽창이 발생하게 된다.

터파기시 무리하게 구배를 완화하여 토공량을 늘리고, 사면 유동등의 사고 발생으로 인한 공기 연장의 문제를 발생시키기보다는 공사 편리성을 제고하고 저면지반의 팽창을 방지할 수 있는 토류벽에 의한 터파기 방식 채택을 검토해야 한다. 지반안정을 도모하기 위하여 약액에 의한 주입안정 처리공법을 실시하는 경우 사질토에서 효과가 좋으며 점성토에서는 약액의 침투주입이 어렵고 맥상 주입이 되기 쉬우므로 차수 및 강도증가 효과를 기대하기 어렵다. 한편, 세립토를 함유하고 있는 준설매립 토사의 경우 매립완료 지반내에 연약지반이 형성되는 사례가 많은데, ML, MH, CL을 함유한 준설매립 토사의 경우 준설 장비의 배사관 주선배치 간격을 일정간격 이하로 함으로써 준설매립 완료지반내의 연약지반 형성을 최소화 할 수 있다.

#### 6.4.2 기초지반의 지지력 확보

해저지반은 육상지반과는 달리 해수와 그 운동이 해저 지반형성에 큰 영향을 미치는데, 준설 완료지반 및 하부 해저 원지반에 지반 지지력과 관련된 영향은 다음과 같다.

- 1) 퇴적양식이 흙의 구조에 영향을 미친다.
- 2) 급속 퇴적지에서 압밀진행중인 지반이 형성된다.
- 3) 쇄굴에 의해 과압밀이 발생한다.
- 4) 파랑에 의해 매립이 완료된 느슨한 지반에 동적 반복 하중이 작용한다.
- 5) 퇴적지반내에 가스가 발생한다.
- 6) 전해질을 가진 간극수가 점토의 역학적 거동에 영향을 미친다.

이러한 해저지반의 특이한 공학적 특성 때문에 이들 지반과 관련된 건설공사에 있어서 많은 문제점을 안고 있다. 매립대상지역에 점성토를 준설 매립하는 경우, 조성된 지반은 극도로 연약하여 일반적으로 준설 전에 60~80%의 함수비를 가지던 지반이 준설과정 중 혹은 준설매립 직후 300%정도의 함수비를 가지게 되고, 이러한 지반은 거의 지지력을 가지지 못하는 슬러리 상태가 된다. 매립공사 종료 후 수개월 방치하면 함수비는 점차로 감소하지만 건조수축이 진행되는 부분은 지표면 부근 20~60cm 정도에 제한되어 나타난다. 수위가 지표면 부근에 존재하는 경우에는 점토층의 함수비는 매립후 상당시간 경과 후에도 100%를 훨씬 상회하는 값을 갖는다.

준설직후의 역학적 성질은 매우 연약하여 토질시험이 어렵고 이에 관한 자료 또한 극히 한정적이다. 이러한 지반에 구조물을 건설하는 방법 중 말뚝에 의하여 지지되는 고정식 기초 구조물에 관해서는 지지층까지의 깊이와 지지력을 파악하는 것이 중요하며, 중력식 구조물에서는 제방의 단면 안정에서와 마찬가지로 활동, 전도, 액상화에 대한 지반 안정성 등을 검토해야 한다.

#### 6.4.3 최종 체절과 관련된 지반공학적 문제

준설매립에 있어서 주축은 방조제 공사이며 그 방조제 공사중에서도 최종 체절이 가장 중요하다. 최종 체절이란 방조제 공사에서 내수면과 외수면의 경계가 되는 방조제를 최종적으로 완성하는 구간에서의 공사를 말한다. 체절구간이 축소될수록 조류속도는 증가하고, 이로 인하여 축조재료와 원지반이 유실되어 막대한 피해를 입으므로 최종 체절공사는 해안공학적 문제점을 포함하여 여러 가지 사항이 함께 고려되어야 한다. 최종 체절구간의 해상 저면이 암반이나 각종 수리변화에 유지될 수 있는 단단한 지반인 경우에는 아무런 문제가 없으나, 해상 저면이 사질토 또는 점성토인 경우에는 체절시의 조석류에 의한 유실, 세굴, 침하, 파이핑 등이 발생한다. 이러한 경우에는 바닥보호공을 설치하여야 하며, 세굴토량의 되메우기를 감안한 토공설계가 수행되어야 한다. 바닥보호공은 구조상으로 기초공, 피복공, 지수공으로 구분되며, 체적규모와 시공능력, 그리고, 조류, 수리 상황 등에 따라 달라질 수 있다.



### 1) 체질구간의 기초공

최종 체질구간의 기초지반은 제방 기초지반에 비하여 체질시 급속재하를 받아 보다 큰 지지력을 필요로 하므로 이에 대응하여야 하며, 축제기간을 이용하여 사전에 지반을 압밀침하시켜 지지력의 증가를 유도하여야 한다. 투입재의 크기는 유속에 의해 유실되지 않아야 하며, 지반토상에 매트리스등을 부설하거나 필터층을 조성하여 파이핑 작용 또는 유속에 의한 흡출작용도 방지하여야 한다.

### 2) 체질구간의 바닥피복공

유속에 충분히 견디는 재료로 서로 일체가 되어 기초지반을 보호하고 유실, 세굴 및 양압력에 안전하도록 계획, 시공되어야 한다. 바닥 피복공법으로는 강점토와 혼합된 사력 깔기공, 사석, 콘크리트 블록, 돌망태공, Asphalt paving공법 등이 주로 이용된다.

### 3) 지수공

최종 체질을 완료하면 유속으로 인하여 축조재료가 단면 밖으로 유하하고, 해상작업시 단면 밖으로 투하된 것들이 투수층을 형성하게 된다. 이로 인하여 바깥쪽 해수가 바다보호공 상부와 하부로 침투하고, 수위차에 비하여 투수로 길이가 짧으면 파이핑 현상이 발생하여 지반유실이 일어나게 된다. 그 대책 공법으로 다음과 같은 사항을 검토하여야 한다.

- (1) 성토의 폭을 확대하여 충분한 침투로 길이를 확보한다.
- (2) 소규모 방조제에서는 바다보호공 시공전 지수벽을 넣어 시공함으로써 파이핑을 방지한다.
- (3) 수심이 깊고 규모가 큰 방조제에서는 필터를 사용한다.

## 6.5 국내 연약지반 처리공법 사용실태

### 6.5.1 서해지역

서해안의 경우는 인천 남동공단 및 영종도 신공항의 경우를 제외하고 목포 이북지역으로 수직배수공법은 사용하지 않았으며, 성토에 의한 자연 압밀형태를 취한 양상을 볼 수 있다. 이는 서해안측 공사지역의 연약층 심도가 낮기 때문에 압성토에 의한 압밀이 가능했기 때문이라 판단된다. 인천지역의 토질특성은 ML 성분이 강하게 나타났으며, 점토 함유율이 매우 낮게 나타나 압축성이 작으리라 판단된다. 아산지구 및 금강지구는 타지역에 비해 압축성이 작아 무처리와 성토에 의해 자연압밀을 시켜 안정을 도모한 경우가 많았다.

모래 성분에 퇴적되어 있는 지역은 조류의 양상에 따라 불규칙한 분포를 보이고 있으나 대체적으로 서해안 측에서 많이 발달되어 있으며, 특히, 아산지역 및 금강하구 지역에서는 대규모의 사질토층이 나타나기도 하였다.

6.5.2 남해지역

남해안의 경우 대단위 매립현장이 조성되는 지역은 광양만 및 부산지역이며 국부적으로 해남, 고흥, 마산지역에서는 매립공사를 시행하였거나 할 예정이다. 연약지반 처리공법의 형태를 살펴보면 팩 드레인 공법과 페이퍼 드레인 공법, 샌드 드레인 공법이 성토와 병행하여 복합적으로 사용되었으며, 특별히 지역적 특성을 나타내고 있지 않다.

특히, 신호공단, 명지주거단지, 김해지역에서 샌드 드레인 공법, 팩 드레인 공법 등이 사용되어지는 이유는 상부층에 모래층이 분포하기 때문인 것으로 판단되며, 여수지역의 경우 광양제철측에 모래층이 분포하고 있으므로 페이퍼 드레인 공법과 타공법을 병행하여 사용한 것으로 판단된다.

또한, 남해안의 경우 광양만지역은 준설매립이 대부분을 차지하고 있으며, 이는 매립재의 부족한 실정과 항로 준설의 복합적인 조건을 만족하기 위한 선택이었다고 판단된다. 부산지역의 매립현장은 준설매립이 없으나 실제 시공시 매립재가 부족한 공사로 인하여 공사가 지연되는 현상이 많다고 전해지고 있다. 샌드 드레인 공법은 남동부지역(경남, 부산)에 밀집되어 있는 양상을 보이고 있으며, 이러한 샌드 드레인 공법 사용은 지역적, 시간적 영향을 복합적으로 받은 것으로 판단된다.

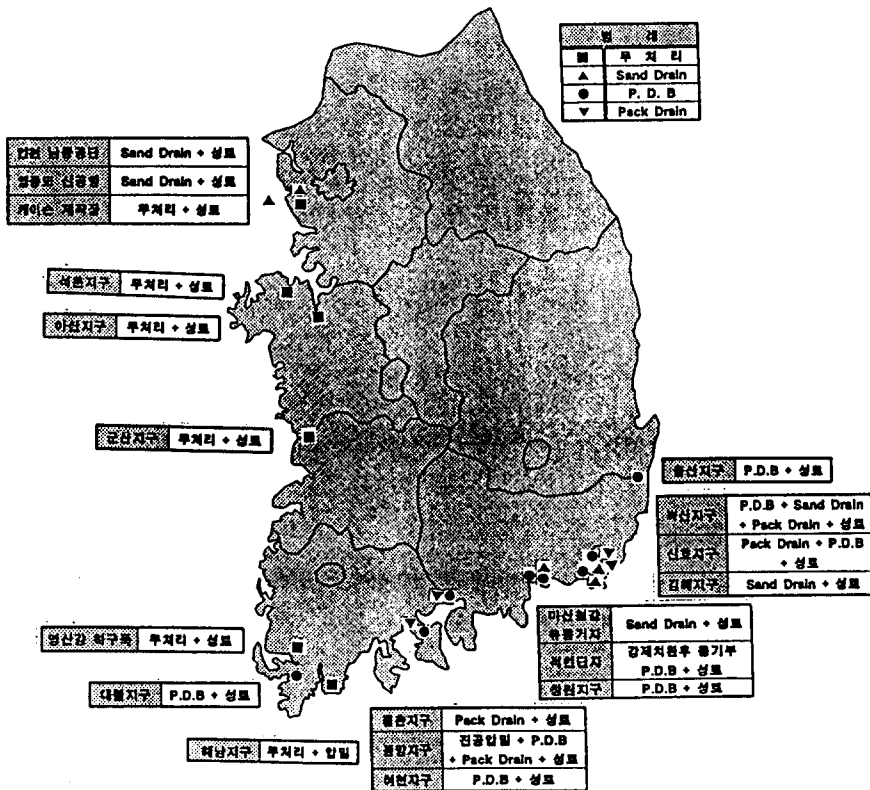


그림 13. 국내 연약지반 처리공법 사용실태

### 6.5.3 연약지반 처리공법 사용실태

표 10. 연약지반처리공법 사용실태

공법	팩 드레인	샌드 드레인	페이퍼 드레인	무처리
사용년도	1994(울촌)	1989(광양제철소)	1976(적현)	1976(영산강)
	1995(신호)	1991(남동)	1981(울산)	1989(해남)
	1996(양산 I)	1992(김해)	1990(대불)	1989(석문)
		1995(창원)	1990(마산)	1993(군장)
			1993(여천)	1994(아산)
			1993(녹산)	1994(새만금)
			1995(광양콘테이너)	1996(군장)

표 10과 같이 연도별 연약처리 처리공법의 사용실태를 살펴보면 연직배수 처리없이 성토에 의한 자연 압밀은 꾸준히 사용되고 있으며, 앞 절에서 고찰한 바와 같이 지역적인 특색이 강하게 나타나고 있다. 페이퍼 드레인 공법은 무처리 사용실태와 마찬가지로 꾸준히 사용되고 있으며, 현재까지도 각광을 받고 있다.

현재 국내에서 매립공사가 시행되는 지역의 대다수가 수심 25m 이내의 연약지반이며, 충투께가 10~30m 이내의 지역에 집중되어 있다. 퇴적층이 사질토층 이상의 조립토층으로 점토층과 교호되지 않는 지역이 대부분이기 때문에 페이퍼 드레인 공법이 많이 사용되고 있다. 또한, 연약층 상부의 표준관입 시험치가 0에 가까워 Trafficability가 매우 나쁘므로 타설장비의 경량화 문제가 대두되어 무처리로 사용하는 경우가 많다.

샌드 드레인 공법과 팩 드레인 공법은 약간 시대적인 경향에 따라 그 사용성이 다르게 나타난다. 1980년대 말에서 1990년 초에는 샌드 드레인 공법이 많이 사용되었으나, 1994년 이후에는 거의 팩 드레인 공법 사용이 급증하고 있다.

팩 드레인 공법이 도입된 초기에는 사용실적의 부족과 신뢰도 측면에서 매우 부정적이었으나 현재는 많은 현장에서 사용중에 있으며 이미 사용효과가 입증된 상태이다. 팩 드레인 공법과 샌드 드레인 공법이 유사한 점이 많지만 팩 드레인 공법은 샌드 드레인 공법에 비해 스미어 존, 드레인재의 절단 가능성이 적다는 장점과 모래 양의 절감 및 시공성이 좋다는 장점을 지니고 있다.

발주처별 특색으로는 한국 농업진흥공사에서 시행한 매립공사는 주로 부지사용이 농토로 이용되므로 연약지반 처리로 시행하는 공단 부지나 주택부지와는 처리상의 차이가 있어 제방이나 하구둑 위치에서만 연약지반 처리를 하고 있는 실정이며 대다수가 성토에 의한 자연 압밀을 시행한 특성을 가지고 있다.

## 7. 결 언

국내에서도 준설에 의한 많은 지반조성 공사가 진행되고 있으며, 연약지반에 대한 안정처리를 위해 많은 공법이 도입되어 적용되고 있다. 그러나, 이러한 공법의 대부분이 외국으로부터 도입되었으며 현재도 많은 기술인력이 일본이나 북유럽으로 기술도입을 위해 시찰을 하고 있는 실정이다. 이렇게 많은 기술을 배워오고 도입하는 것도 중요하지만 그러한 기술이 국내의 여건에 적합한가를 충분히 검토한 후에 적용하는 것이 필요하리라 본다. 특히, 준설매립공법을 이용하여 부지를 조성하는 경우, 준설에서 투기 및 지반의 안정화 처리단계까지의 전과정에 있어서 아직도 외국의 기술을 그대로 답습하고 있는 형편이다. 따라서, 시공의 정확성과 경제성을 도모하기 위해서는 국내 실정에 맞는 공법 및 기술을 개발해야 한다. 또한, 최근에 들어 국내에서도 항로나 수로 유지를 위한 준설작업도 큰 관심사로 떠오르고 있지만 경제적인 여건 등으로 인하여 시행되고 있고 있다. 특히, 금년과 같이 계절라성 집중호우로 인한 수해를 방지하기 위해서는 하상에 퇴적된 토사에 대한 준설이 필요하다. 따라서, 국내에서도 부지조성을 위한 매립사업 뿐만 아니라 하천수심확보를 위한 준설에도 많은 관심을 기울여야 하리라 본다.

## 참고문헌

1. 건설부(1986), "구조물기초 설계기준"
2. 건설부(1985), "도로포장 설계시공지침"
3. 건설산업조사회 연약지반 핸드북 편찬위원회(1984), "최신 연약지반 핸드북", 동경
4. 평원엔지니어링(1993), "광양만1단계 개발사업 연약지반처리 실시설계 보고서 "
5. 김상규(1987), "우리나라 연약지반의 실태," 대한토목학회지, 제35권, 제6호, pp. 14-21
6. 박경호 외(1997), "울촌산단 준설매립공법 설계 및 시공사례", 한국지반공학회 준설매립위원회 학술발표회, pp.69-86
7. 이규환(1995), "침투압을 이용한 준설매립지반의 압밀특성에 관한 연구", 서울시립대학교 석사학위 논문.
8. 인천직할시 공영개발사업단(1993), "송도지역 공유수면 매립사업 실시설계 보고서"
9. 한국토지개발공사(1987), "연약지반처리공법"
10. 한국지반공학회(1995), "연약지반", 지반공학 시리즈 6, pp.1-386
11. 황규호(1992), "준설연약점토의 자중압밀 특성에 관한 연구", 서울시립대학교 석사학위 논문.
12. LG 건설(1996), "준설매립된 연약지반 안정처리 현장의 시공사례".
13. Been, K., and Sills, G. C.,(1981)"Self Weight Consolidation of Soft Soils" Geotechnique, Vol.31, No.4, pp. 519-535
14. Bai-Rong Ye, Shun-ying Lu, and Yi-Sheng Tang(1983), "Packed Sand Drain Atmospheric Preloading for Strengthening Soft Foundation", Proceedinds of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki.

15. Bowles, J.E.(1979), "Physical and Geotechnical Properties of soils", McGraw-Hill.
16. Choa V.(1989), " Drains and vacuum preloading pilot test." Proc 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, pp.1347-1350
17. Cognon J.M., Juran I.(1994), "Vacuum Consolidation Technology Principles & Field Experience", Vertical & Horizontal deformations of Foundation & Embankments, Geotechnical Special Publication. No.40 ASCE. pp.1237-1248.
18. Lin, T. w. and Lohnes, R. A., "Sedimentation and Self Weight Consolidation of Dredge Spoil", Conference Proceeding, ASCE, 1984 pp. 464-480.
19. 矢野弘一郎(1985), "浚渫粘土による軟弱地盤の性状とその豫測", 土木學會 論文集, 第364號, pp.1-4.