

## 조력발전 구조물 설계를 위한 지반조사 - 인천만 지반조사 사례 -

오 명학<sup>1)</sup>, 이 광수<sup>2)</sup>, 박 진순<sup>3)</sup>, 염 기대<sup>4)</sup>, 차 대욱<sup>5)</sup>, 양 근훈<sup>6)</sup>

### Geotechnical Site Investigation for Designing of Tidal Power Plant Structures

#### - Case Study on Site Investigation at Incheon Bay -

Myounghak Oh, Kwangsoo Lee, Jinsoon Park, Kidai Yum, Daiwook Cha, Geunhun Yang

**Key words** : Tidal power plant(조력발전소), Geotechnical site investigation(지반조사), Incheon bay(인천만), Soft ground(연약지반)

**Abstract** : The main structures that comprise a tidal power plant are turbine structure, sluice structure, tide embankment and gate. Since these structures are founded on seabed ground, an extensive geotechnical site investigation to evaluate the engineering properties of field soils must be conducted prior to design and construction. According to the results of geotechnical site investigation conducted at the planned site for construction of Incheon bay tidal power plant, soft ground generally lie 7 meters below the seabed surface level. This research suggests the reliable and economical design of foundations and ground improvements required for construction of main structures in Incheon bay tidal power plant, with considerations on field conditions.

#### Nomenclature

$C_c$  : compression index  
 $c_u$  : undrained shear strength,  $kg/cm^2$   
 $p_c$  : preconsolidation pressure,  $kg/cm^2$   
 $q_u$  : unconfined compressive strength,  $kg/cm^2$

#### subscript

UU : unconsolidated undrained

### 1. 서론

조력발전은 조석을 동력원으로 하여 해수면의 상승하강현상을 이용하여 조석의 위치에너지를 전기에너지로 변환하는 발전방식이다. 일반적으로 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 방조제를 설치하여 조지를 만들고 외해수위와 조지내의 수위차를 이용하여 전기를 생산하게 된다.

조력발전은 발전량 측면에서는 조석간만의 차

가 크고 조성되는 조지면적이 넓을수록 유리하고, 건설비 측면에서는 설치되는 댐의 길이가 짧을수록 유리하다. 우리나라 서해안은 굴곡이 심한 리아스식 해안으로 크고 작은 만이 발달해 있고 조차가 커서 세계적인 조력발전의 적지로 알려져 있다. 우리나라의 조력에너지 부존량은 약

- 
- 1) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : omyhak@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7817 Fax : (031)408-5823
  - 2) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : kslee@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6300 Fax : (031)408-5823
  - 3) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : jpark@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7805 Fax : (031)408-5823
  - 4) 한국해양연구원  
E-mail : kdyum@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6011 Fax : (031)408-5821
  - 5) 현대엔지니어링(주) 토건·환경사업본부  
E-mail : dwcha@hec.co.kr  
Tel : (02)2166-8726 Fax : (02)2646-6496
  - 6) 현대엔지니어링(주) 토건·환경사업본부  
E-mail : khyang@hec.co.kr  
Tel : (02)2166-8734 Fax : (02)2646-7808

650만kW 정도로 추정되며, 이중 개발가능한 조력 에너지는 약 240만kW에 달하는 것으로 평가되고 있다. 주요 개발후보지로는 시화호, 가로림만, 인천만, 천수만 등이 있다. 시화호에는 청정 에너지 생산 및 해수유통을 통한 시화호 수질개선을 목적으로 25.4만 kW급 조력발전소를 2009년 완공을 목표로 건설중이며, 가로림만에는 2012년 완공목표로 약 50만kW급 조력발전소 건설 기본계획을 수립중이다. 또한, 인천만에 대해서는 조력발전 예비타당성 조사를 수행중에 있다.

조력발전을 위한 주요 구조물에는 수차구조물, 수문구조물, 방조제, 통선문 등이 있으며, 이들 구조물들은 해상에서 하부지반위에 놓이게 되므로 구조물의 경제적이고 안전한 설계 및 시공을 위해서는 지반의 공학적 특성 평가를 위한 지반조사가 필수적으로 수행되어야 한다.

본 논문에서는 인천만 조력발전 예비타당성 조사의 일환으로 조력발전 주요 구조물의 기초설계를 위하여 수행된 인천만에서의 해상 지반조사 사례를 제시하였다.

## 2. 인천만 지반조사 개요

인천만에서 수행된 해상지반조사는 인천만 조력발전 예비타당성 조사 및 기본계획 수립을 위해 수행되었다. 본 조사에서는 조력발전 예정 해역을 대상으로 시추조사와 현장원위치 시험 등의 각종 현장조사와 실내시험을 실시함으로써 방조제 및 조력발전 구조물 구간의 지층 상태와 지반의 공학적 특성을 규명하여 조력발전 구조물에 대한 최적의 설계 기본자료를 제공하고자 하였다.

### 2.1 조사대상지역

조사위치는 인천만 일원의 강화도, 장봉도, 용유도, 영종도로 둘러싸인 해역으로 조사위치 및 주요현황은 그림 1과 같다.

### 2.2 조사내용

본 지반조사에서는 표 1과 표 2에 제시된 바와 같이 현장조사 및 실내시험을 실시하였다.

시추조사는 조력발전 구조물 및 방조제 예정 구간에서의 지층분포 상태 및 지지층, 연약지반 심도를 확인하고, 역학시험을 위한 불교란 시료를 채취하기 위하여 수행되었다. 현장 원위치 시험으로 토사층 설계지반정수 도출 및 연약지반 특성 분석을 위한 표준관입시험, 점성토의 비배수 전단 강도 및 예민비 산정을 위한 현장배인시험, 연약지반 토층판별 및 압밀특성과 강도특성 분석을 위한 피에조콘관입시험이 수행되었다. 또한, 기본

물성시험과 연약지반의 강도 및 압밀특성 분석을 위하여 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험 등 실내역학시험을 수행하였다<sup>(2)</sup>.

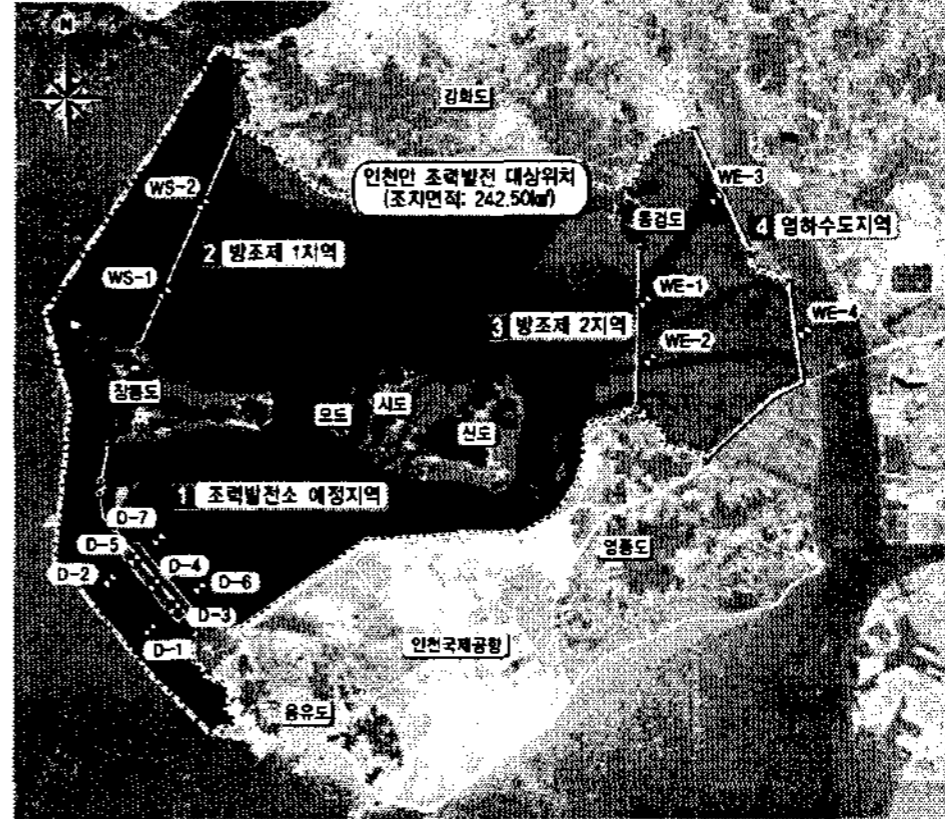


Fig. 1 Geotechnical site investigation at Incheon Bay

Table 1. Boring and soil sampling

구 분	시추조사	시료채취
조력발전 예정지 구간	7공	-
방조제 구간	4공	4회
염하수도 구간	2공	11회
계	13공	15회

Table 2. In-situ and lab. tests

구분	시험내용	수량
현장 원위치시험	표준관입시험	261회
	현장배인시험	17회
	피에조콘관입/소산시험	3공/3회
기본물성 시험	함수비시험 비중시험 액소성시험 입도분석시험	41회
역학시험	일축압축시험 삼축(UU)압축시험 압밀시험	15회

## 3. 인천만 지반조사 결과

### 3.1 해저지형특성

그림 2는 해상수심측량자료를 이용하여 구축한 인천조력발전 예정 해역의 해저지형에 대한 DEM 결과이다. 조력발전소 예정지역의 특성은 비교적 퇴적층의 층후가 얇고, 조류의 속도가 빠

르며, 해성기원의 사질토이 상부 퇴적층의 연약지반을 이루는 특징이 있으며, 방조제 지역과 염하수도 지역은 퇴적층 층후가 매우 두꺼우며, 조류의 속도가 느리고 비해성기원 퇴적층이 하부에 두껍게 분포하는 특성을 나타낸다.

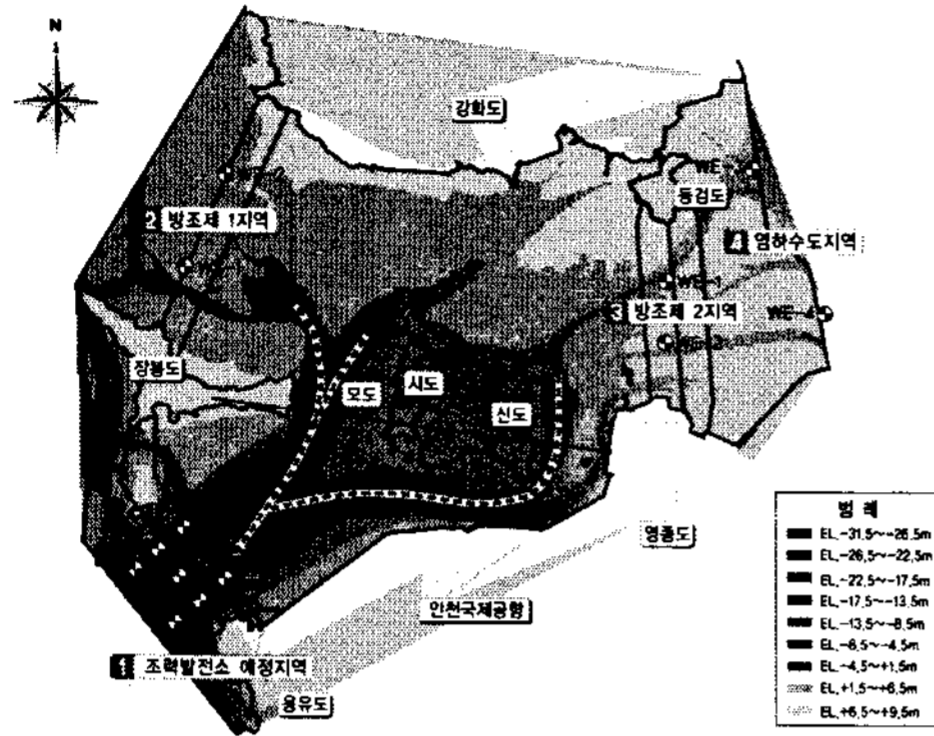


Fig. 2 Sea-bed characteristics of target site

### 3.2 지층분포 특성

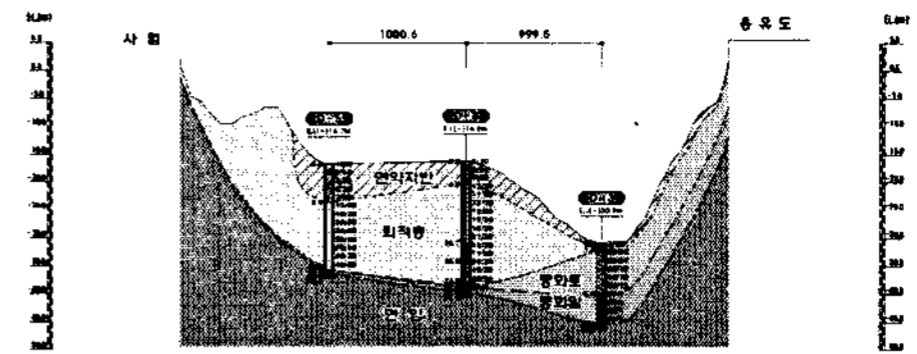
대상지역에서 시추조사를 수행하여 구한 대표적인 구간의 지층단면도는 그림 3과 같다.

### 3.3 연약지반 분포특성

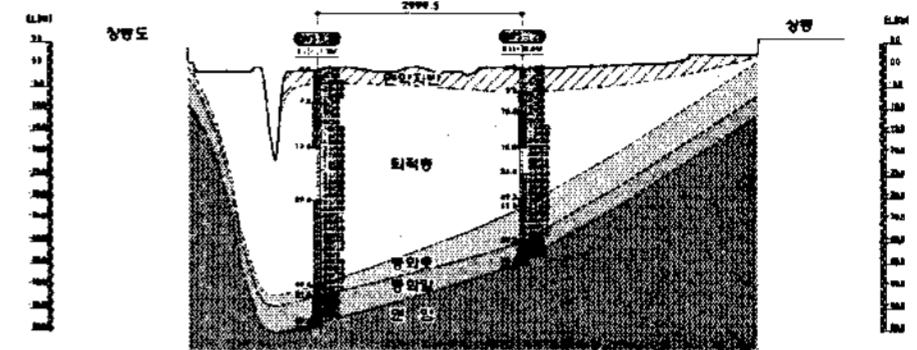
연약지반은 상부구조물을 지지할 수 없는 상태의 지반을 말한다. 모래는 연약성을 상대밀도로 표시하며, 점토는 굳기로 표시한다. 표 3에서 알 수 있듯이 모래의 상대밀도가 35% 이하이면 연약지반으로 분류하며, 현장에서 표준관입시험을 하여 N값이 10이하이면 연약지반으로 분류될 수 있다. 점토지반의 경우에는 표 4에 제시된 바와 같이 0.50kg/cm<sup>2</sup> 연약점토로 구분되며, 표준관입시험을 수행하여 N값이 4이하이면 연약지반으로 구분될 수 있다<sup>(3)</sup>.

조력발전소 예정지역은 퇴적층후가 15m 내외 정도로 전체 지역에 비해, 전반적으로 얇은 층후를 나타내며, 방조제 및 염하수도 지역은 평균 30m 정도의 매우 두꺼운 퇴적층을 이룬다.

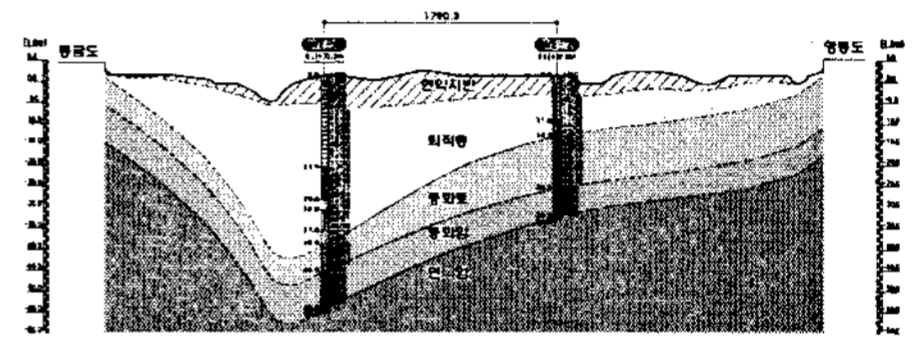
대상지역에 분포하는 연약지반은 N치가 대략 1/30~10/30 정도이며, 전반적인 연약지반의 분포심도는 지표면으로부터 대략 7m 내외 정도이며, 조류의 흐름이 매우 빠른 지역(조력발전소)은 연약지반의 주성분이 모래가 우세한 특징을 나타내는 반면, 조류가 상대적으로 느린 지역(방조제 및 염하수도) 점토내지 실트가 우세한 편이다.



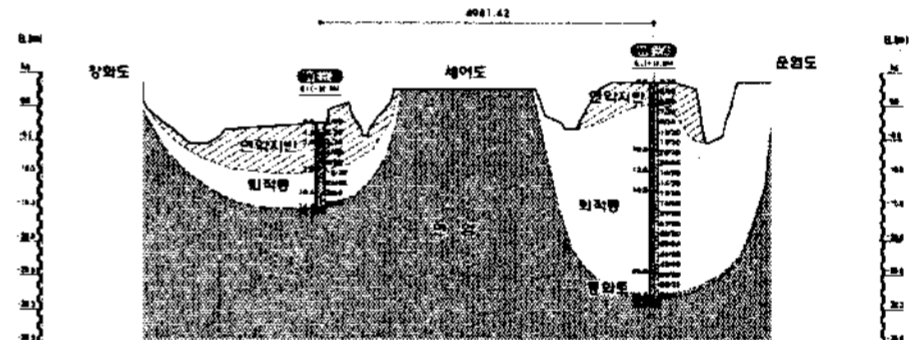
(a) 조력발전소 예정 지역(용유도-시염도 구간)



(b) 방조제 1 예정 지역(장봉도-강화도 구간)



(c) 방조제 2 예정 지역(동검도-영종도 구간)



(d) 염하수도 지역(강화도-영종도 투기장 구간)

Fig. 3 Geologic columnar sections

Table 3. Criterion for judging of soft ground for sand

N값	상대밀도(%)	비고
0 ~ 4	15	대단히 느슨
4 ~ 10	15 ~ 35	느슨
10 ~ 30	35 ~ 65	중간
30 ~ 50	65 ~ 85	촉촉
50 이상	85 ~ 100	대단히 촉촉

Table 4. Criterion for judging of soft ground for clay

굳기	N값	qu
대단히 연약	<2	<0.25
연약	2~4	0.25~0.5
중간	4~8	0.5~1.0
견고	8~15	1.0~2.0
대단히 견고	15~30	2.0~4.0
고결	>30	>4.0

### 3.4 연약지반의 공학적 특성

연약지반의 공학적 특성을 분석하기 위하여 현장원위치시험과 현장에서 채취한 불교란시료에 대한 실내시험을 수행하였으며, 최적의 설계를 위한 합리적인 지반정수를 도출하기 위하여, 조사결과를 인근 설계사례에서 조사된 자료와 비교하여 물리적 특성과 강도 및 압밀 특성을 분석하였다.

대상지역에서 채취한 불교란시료에 대한 기본물성시험 결과는 다음과 같다. 시료의 자연함수비 범위는 27.7 ~ 42.4%로 나타났으며, 심도에 따른 변화는 거의 없는 편이었다. 초기간극비 및 단위중량은 각각 1.067 ~ 1.281, 1.659 ~ 1.956 ton-f/m<sup>3</sup> 정도로 기존 범위에 비해 다소 편중되는 양상을 보였다. 소성지수는 2.6 ~ 38.4% 정도로 토질에 따라 보통 소성에서 낮은 소성상태로 분류되며, 전반적으로 저소성 점토의 함유량이 높게 나타났다.

연약지반 점성토 구간의 일축압축시험, 삼축압축시험(UU) 및 압밀시험의 결과를 표 5에 정리하였다.

Table 5. Results of strength and consolidation tests

공번	심도(m)	일축압축	삼축압축	압밀	
		q <sub>u</sub>	c <sub>u</sub>	p <sub>c</sub>	C <sub>c</sub>
WS-1	8.0~8.8	0.33	0.14	1.12	0.397
	12.0~12.8	0.66	0.43	1.51	0.284
WS-2	8.0~8.8	0.40	0.21	1.31	0.394
	11.0~11.8	0.23	0.16	1.03	0.437
WE-1	0.5~1.3	0.21	0.17	1.27	0.321
	5.0~5.8	0.36	0.15	1.74	0.186
	8.0~8.8	0.41	0.19	1.58	0.171
WE-2	0.5~1.3	0.11	0.07	1.50	0.263
	2.0~2.8	0.32	0.13	1.70	0.193
	3.0~3.8	0.19	0.13	0.92	0.252
WE-3	0.5~1.3	0.33	0.11	1.02	0.275
	2.0~2.8	0.66	0.22	1.23	0.215
	3.0~3.8	0.82	0.30	1.25	0.355
WE-4	2.0~2.8	0.66	0.45	1.71	0.240
	3.0~3.8	0.49	0.37	1.74	0.178

과압밀비 분석에 따른 개략적인 경향은 심도 GL(-) 8m 부근을 경계로 하여 상부는 과압밀층으로 나타났으며, 하부는 정규압밀층으로 구분되었다. 대상지역은 세립사를 함유한 실트가 우세하였으며, 압축지수가 0.4 이하로 보통 압축성 내지 낮은 압축성을 나타내었다.

하중단계에 따라 압밀 계수가 일정한 경향을 나타내며, 실트질 점토(CL)와 점토질 실트(ML)는 하중단계에 따른 변화량이 크지 않았다.

과압지역은 대체로 시험구간까지 과압밀 구간으로 분류되며, 분산이 매우 큰 상태로 심도 증가에 따른 강도 증가의 상관관계를 찾기 어려움

비배수전단강도는 평균 2.34 ton-f/m<sup>2</sup>으로 산정되었으며, 강도증가율은 0.16으로 유효 상재하중 증가에 따른 비배수 전단강도의 증가비는 크지 않는 것으로 판단된다.

### 4. 결론

조력발전의 주요 구조물들은 해상에서 하부지반위에 놓이게 되므로 경제적이고 안전한 설계 및 시공을 위해서는 지반의 공학적 특성 평가가 필수적으로 수행되어야 한다. 인천만 조력발전 개발을 위한 연구가 수행중인 대상지역에 대한 지반조사 결과에 의하면 연약지반은 전반적으로 지표면으로부터 대략 심도 7m 내외 정도로 분포하는 것으로 나타났다. 조력발전 구조물의 설계시 연약지반의 개량이나 기초보강공법은 공학적 특성에 대한 분석결과 뿐만 아니라 시공시의 효율성과 경제성이 함께 고려되어야 한다. 따라서, 향후 인천만 조력발전 타당성 조사와 기본계획 수립시 연약지반의 분포상태와 공학적 특성을 반영하고 공법별 장단점에 따른 시공성과 경제성을 고려하여 조력발전 주요 구조물의 기초 및 지반보강공법을 설계할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부 해양수산연구개발사업인 “조력·조류에너지 실용화 기술 개발”사업의 일환으로 수행되었습니다.

### References

- [1] 해양수산부, 2002, 해양에너지 실용화 기술 개발(II): 조력·조류에너지.
- [2] Head, K.H., 1992, Manual of soil laboratory testing, 2nd Ed., Pentech Press Ltd.
- [3] 한국지반공학회, 1997, 연약지반, 구미서관.