

# 해상풍력 파일기초설계

2014. 11. 20

박두희 교수  
한양대학교 건설환경공학과

박정선  
한양대학교 건설환경공학과 박사과정





# Outline

1. 해상풍력발전기 지지구조물 개요

2. 해상풍력 기초 설계기준 및 일반사항

3. 해상풍력 기초 종류별 설계 방법

4. 수치해석 및 모형실험 연구





# Outline

## 1. 해상풍력발전기 지지구조물 개요

### 2. 해상풍력 기초 설계기준 및 일반사항

### 3. 해상풍력 기초 종류별 설계 방법

### 4. 수치해석 및 모형실험 연구





## 해상풍력 기초의 종류

### ● 해상풍력 기초 종류 / 형상별

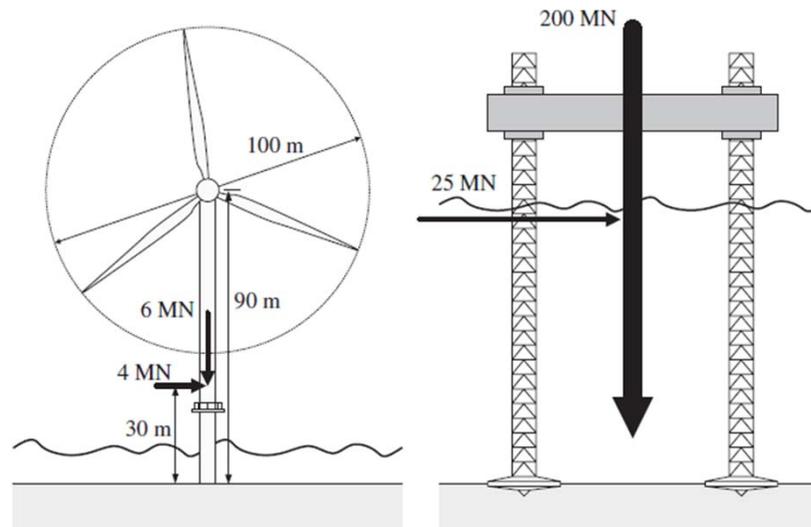
	중력식 기초 (Gravity base)	모노파일 (Monopile)	재킷 (Jacket)	트라이포드 (Tripod)
개념도				
적용수심	(0~15m)	(10~30m)	(20~50m)	(20~50m)
지반조건	단단한 지반 지반이 잘 정리된 곳	퇴적토사 및 연암지반	연약층	연약층
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>경제적임</li> <li>불량한 지반에서는 안정성이 떨어짐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>대단위 단지의 경우 경제적임</li> <li>피로하중과 부식문제</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>가벼우며 강성 우수</li> <li>파력하중을 덜 받음</li> <li>대단위 단지의 경우 경제성 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>대용량 터빈 사용 가능</li> <li>전도에 대한 저항성 우수</li> <li>경제성이 낮음</li> </ul>

### ● 관입방법: 하중 관입 / 석션 관입



## 해상풍력 지지구조물 특징

- 해상구조물의 특징
  - 바람, 조류, 파랑 등에 의해 발생하는 **수평하중**이 육상구조물에 비해 크게 작용함
  - 바람, 조류 및 파랑 등으로 대표되는 수평하중은 자중과 다르게 **반복적으로 작용**하므로 재료의 피로파괴로 인한 안정성에 영향을 줌
  - 하중이 가해지는 작용점의 위치가 높기 때문에 구조물에 상당히 **큰 모멘트가 작용**함



해상풍력발전기와 해상플랫폼에 작용하는 하중 (Byrne and Houlsby, 2003)



# Outline

1. 해상풍력발전기 지지구조물 개요

**2. 해상풍력 기초 설계기준 및 일반사항**

3. 해상풍력 기초 종류별 설계 방법

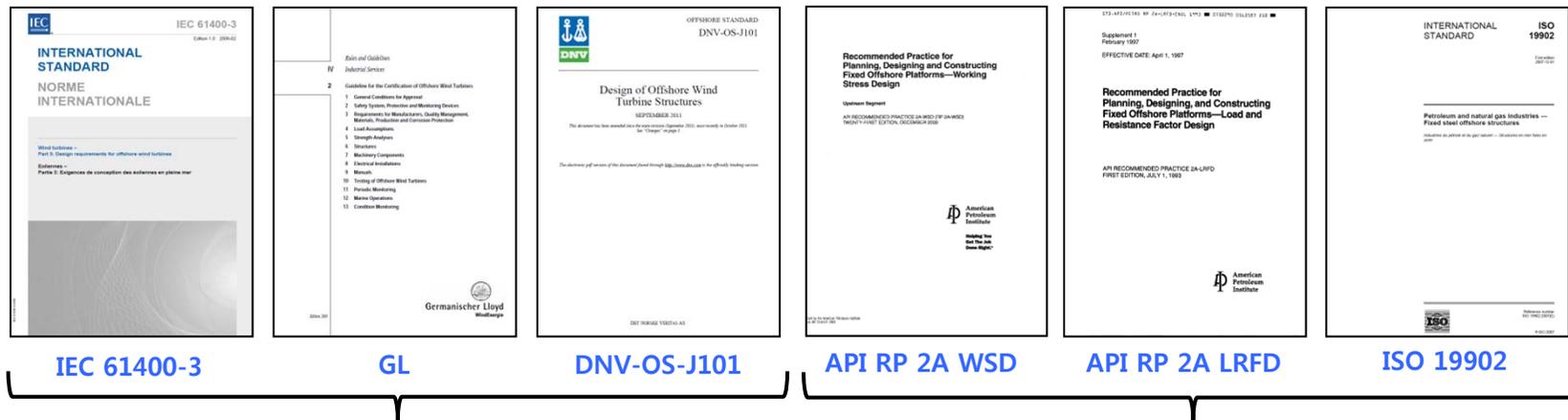
4. 수치해석 및 모형실험 연구





## 국내외 해상풍력 설계기준

- 해상풍력발전기 기초에 관한 국내의 설계기준은 전무한 상황임
- 국외 해상풍력발전기 기초 설계기준
  - International Electrotechnical Commission(IEC) – IEC 61400-3
  - Germanischer Lloyd(GL) – Guideline for the certification of offshore wind turbines
  - Det Norske Veritas(DNV) – DNV-OS-J101
  - American Petroleum Institute(API) – API RP 2A Working Stress Design
  - American Petroleum Institute(API) – API RP 2A Load and Resistance Factor Design
  - International Organization for Standardization(ISO) – ISO 19902



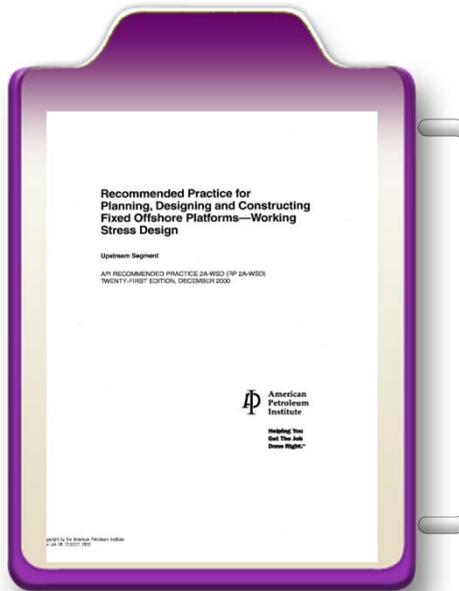
해상풍력발전기 전용 설계기준

해상 구조물 범용 설계기준



## 국내외 해상풍력 설계기준 비교

- American Petroleum Institute (API)
  - Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms
    - Working Stress Design API RP 2A-WSD (21차 버전 2000, 2010 최종 수정판)
    - Load and Resistance Factor Design API RP 2A-LRFD (1차 버전 1993) → ISO 기준에 상당부분 통합되고 있음



- API에서는 유전사업과 관련한 해양산업 부분에서 고정식 구조물과 부유식 구조물을 포함하여 500여개가 넘는 분야에서의 설계기준 및 가이드라인을 제시하고 있음
- API는 1969년 처음으로 해상플랫폼에 대한 실무 가이드라인(API RP 2A Working Stress Design)을 제시한 이후 변화되는 산업분야의 요구와 산업발전에 따른 필요성을 충족시키기 위해 실질적으로 확장 및 세분화함
- API RP 2A는 파고, 바람, 해류 및 지진 등의 외부 환경조건을 고려하여 해상구조물의 설계 전반에 대한 내용은 포함하고 있으나, 해상풍력 하부구조물 설계에 요구되는 상세기준은 포함하고 있지 않으므로 해상풍력 하부구조물 설계 시 전용 설계기준을 일부 참조할 것을 명시하고 있음
- API RP 2A는 허용응력설계법(WSD)와 하중저항계수법(LRFD) 두 가지 방식의 설계기준을 제시하고 있음



## 국내외 해상풍력 설계기준 비교

- International Organization for Standardization (ISO)
  - Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures
  - ISO-19902 (2007)



- 1947년에 설립된 국제표준기구로서 157개국의 국가표준기구들과 네트워크를 형성하고 있으며 국제기준, 산업, 기술 분야에 이르기까지 다양한 분야에 대한 국제 표준을 제시하고 있음
- 해상기술과 관련이 있는 부분은 ISO 19900~19909 시리즈
- 해상기술과 관련하여 해상풍력발전기에 대한 기준을 상세하게 제시하고 있지는 않으나, 일반적인 해상 구조물에 대해서 규정하고 있으며 특별히 구조물의 건전도에 대한 규정을 가지고 있음
- ISO 규정은 API 규정과 마찬가지로 offshore structure에 대한 전반적인 규정을 제시하고 있음



## 국내외 해상풍력 설계기준 비교

- International Electrotechnical Commission (IEC)

- International standard. Wind turbines-Part3: Design requirements for offshore wind turbines
- IEC 61400-3 (2009)

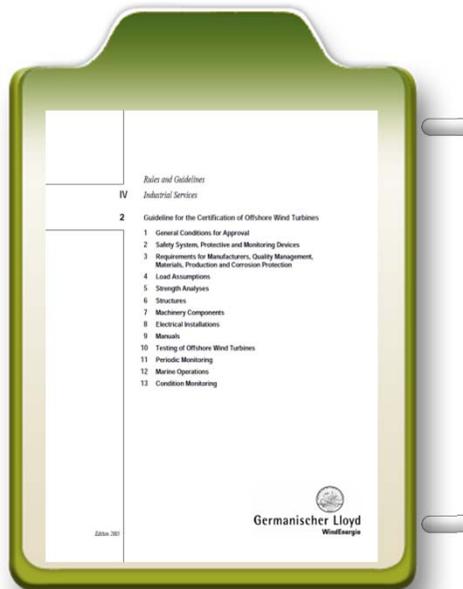


- 풍력발전기에 대한 국제적인 가이드라인이 1988년 International Electrotechnical Commission 기술 위원회 TC-88에 의해서 처음 만들어짐
- IEC 61400은 총 10개의 가이드라인으로 구성되어 있으며, IEC 61400-3의 경우 해상풍력 구조물뿐만 아니라 해상풍력 관련된 subsystem 설계 관련된 내용까지 포함하고 있음
- 특히 해상풍력 구조물 설계를 위한 모든 운영 시 조건을 고려할 수 있는 설계하중 (wind, wave, current, tidal, ice 등)에 대한 상세한 규정을 34개 설계하중조건으로 구분하여 제시함
- 저항력 산정을 위한 설계기준 및 저항계수는 특별히 제안하고 있지 않으며, 설계 시 다른 해상구조물 설계기준을 사용할 것을 권고하고 있음
- 기초설계를 위한 특별 고려사항은 다음과 같음  
: 기초설계는 정하중과 동하중에 의해서 설계되어야 함, 반복적인 하중효과에 대하여 특별한 고려가 필요함, 해저면의 거동에 대한 고려가 이루어져야 함, 지반의 액상화 가능성/ 장기침하 거동 및 유동/ 사면안정 등이 고려되어야 함



## 국내외 해상풍력 설계기준 비교

- Germanischer Lloyd (GL)
  - Guideline for the certification of offshore wind turbines (2005)

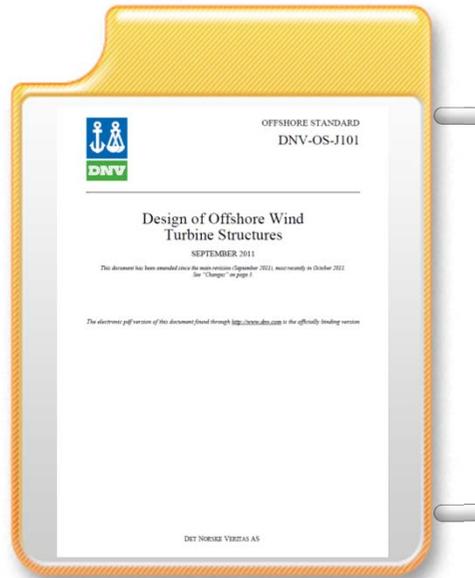


- Germanischer Lloyd는 해상풍력발전기 인증 가이드라인에 따라 풍력발전기를 인증하는 기관으로 1995년에 처음으로 해상풍력발전기 설계 및 인증에 관한 규정을 제정하였으며, 이후 1999년, 2004년, 2005년에 수정 보완함
- 해상풍력 구조물을 위한 전용 설계서로 해상풍력과 관련된 전반적인 사항(support structure, turbine machinery, blades 등)을 포함하고 있으며, 하중, 물성, 구조물, 기계, 로터 블레이드, 전기 시스템, 안전 시스템 및 모니터링 시스템 분야에 이르기까지 인증과 관련된 기준을 포함하고 있음
- 특히 구조물 기초 설계의 경우 개략적인 내용은 포함하고 있으나 구체적인 내용은 다른 설계서를 참고하도록 제안하고 있음
- 기초구조물 설계를 위한 특별 고려사항은 다음과 같음  
: 지반특성에 따라 전응력해석과 유효응력 해석을 구분하여 수행할 것, 반복하중에 의한 지반의 전단강도 감소를 고려할 것, 액상화 가능성/ 해저면 안전성/ 해저변위 / 세굴 및 세굴 보호공에 대한 검토도 수행할 것



## 국내외 해상풍력 설계기준 비교

- Det Norske Veritas (DNV)
  - Design of Offshore Wind Turbine Structures: DNV-OS-J101 (2011)



- 2004년 처음으로 출판되었으며 해상풍력과 관련된 기본 이론, 기술적 요구사항, 설계 가이드라인, 시공 및 감리에 관한 규정을 제시하고 있음
- DNV 가이드라인은 하부 지지구조물의 설계 및 해상풍력발전기 기초에 대한 상세한 내용을 포함하고 있음
- DNV에 포함된 기초 설계와 관련된 내용은 API RP 2A WSD와 유사하나, 부분안전 계수 설계법을 사용하고 있음
- DNV 기준에서 제시하고 있는 하중조합은 IEC 기준과 유사하며 이러한 하중조합들은 구조물 기초 타입과 부지조건에 따라 일부 보완된 값을 제시하고 있음
- 모노파일의 지지력과 변위를 확인하기 위해 유한차분해석(FDM), 유한요소해석(FEM)을 대신하여 수행할 수 있음을 규정하고 있음
- 설계 시 반복하중에 따른 지반 강도저감 및 누적간극수압을 고려하여 설계하도록 규정하고 있으며, 해저면의 안정성 및 세굴, 세굴 보호공에 대한 설계검토도 요구하고 있음



## 해상풍력 지지구조물 설계 일반

- 한계상태의 정의와 적용 예
- 극한한계상태(ULS, Ultimate Limit State)
  - 구조물이 최대로 견딜 수 있는 하중에 대한 지지력
  - 해상기초의 안전성 확보를 위해서 가장 기본적으로 검토되어야 함
  - 예) 구조물이 과도한 항복상태나 버클링(buckling)이 일어나 지지력이 감소하는 상태 하중이 최대 지지력을 초과함으로써 발생하는 구조물의 주요부분 파괴
- 사용한계상태(SLS, Serviceability Limit State)
  - 운영시 적용할 수 있는 내성 기준
  - 예) 풍력발전기가 제대로 작동하지 않을 정도의 변위  
비구조적인 요소들이나 걸표면에 해가 될만한 변위  
사람에게 불안감을 주는 정도의 진동, 구조물의 외적미관을 떨어뜨리는 변형이나 변위
- 피로한계상태(FLS, Fatigue Limit State)
  - 반복하중의 영향에 의한 파괴
  - 해상풍력구조물은 현저한 양의 수평하중이 시간에 따라 강도와 방향이 변화하므로 이로 인한 재료의 피로상태에 대해서 고려해야 함
  - 기초 시스템에 대한 피로한계상태는 따로 정의되어 있지 않으며 **반복하중에 대해 말뚝 주변의 지반에서 강도감소현상이 발생하는 것을 고려하여 ALS나 ULS에 포함시켜 해석하도록 설명하고 있음**



## 해상풍력 지지구조물 설계 일반

- 한계상태설계법(Limit State Design)

- 국외의 해상풍력발전 설계기준들은 모두 한계상태설계(Limit State Design)을 적용하고 있음
- 하지만 국내의 구조물 설계기준은 현재까지 결정론적 설계법으로 허용응력설계법(Allowable Stress Design)을 대부분 적용하고 있음

$$R_d \geq Q_d$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k$$

$$Q_d = \gamma_f Q_k$$

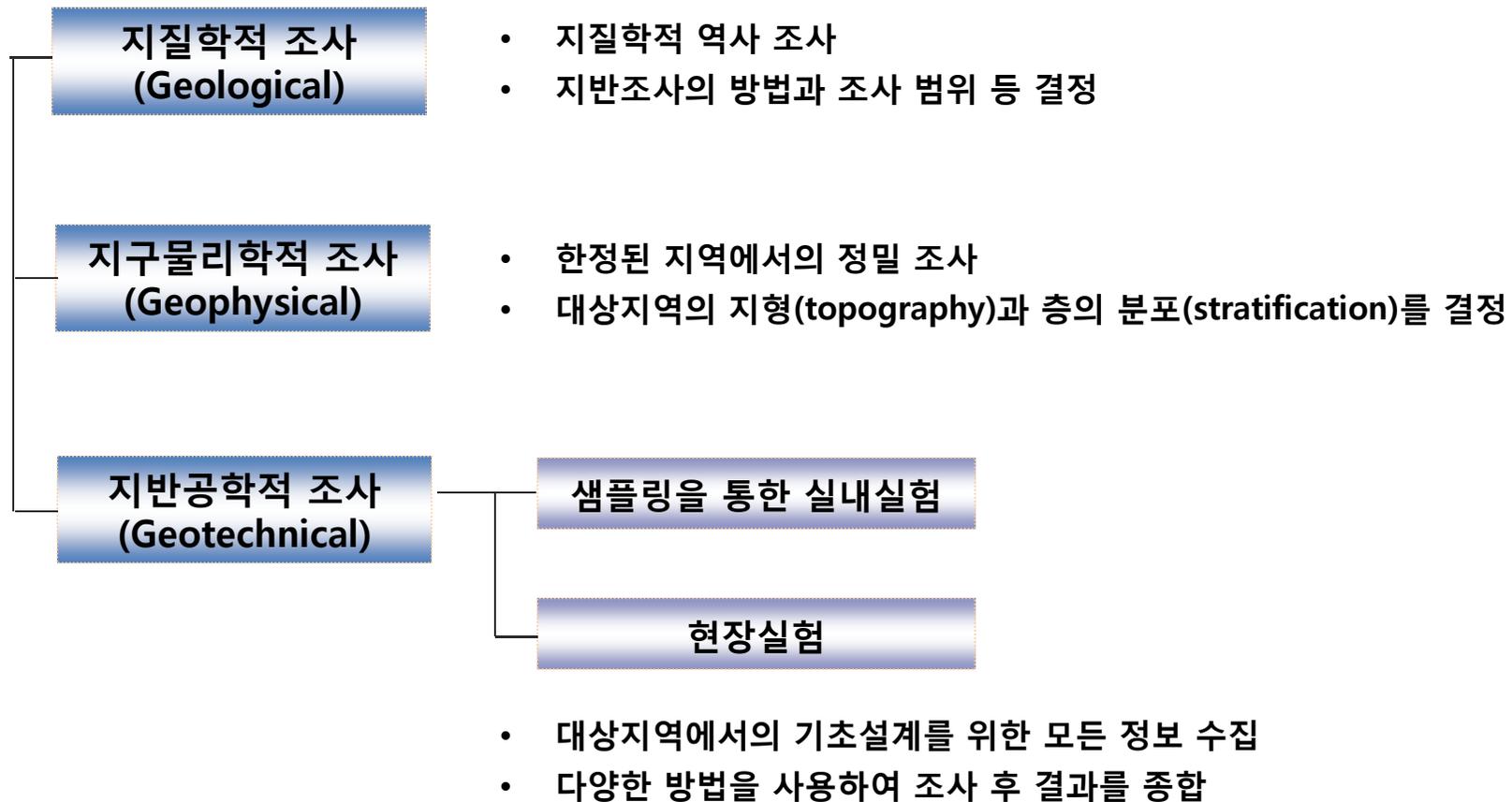
여기서,

$R_d$  = 설계 저항,  $Q_d$  = 설계 하중력,  $\gamma_m$  = 재료에 대한 부분안전계수,  
 $f_k$  = 재료 특성값,  $\gamma_f$  = 하중 계수,  $Q_k$  = 하중 특성값



## 해상풍력 지지구조물 설계 일반

- **지반조사 (Soil Investigation)**
  - DVN Classification Notes No. 30.4





## 해상풍력 지지구조물 설계 일반

### ● 지반공학적 조사 방법

#### 실내실험 조사 (Laboratory investigation)

- Classification and index tests
- Permeability tests
- Consolidation tests
- Static test for determination of shear strength parameter
  - Triaxial test (UU, CIU, CAU,  $K_0$ )
  - Direct simple shear
- Test for determination of remoulded shear strength (UU, CU)
- Cyclic tests for determination of strength and stiffness parameters
  - Triaxial test (CIU, CAU)
  - Direct simple shear
  - Resonant column
  - Shear wave velocity measurement

#### 현장실험 조사 (In-situ testing)

- **Cone penetrometer test (CPT) – most commonly used**
- Remote Vane
- Pressuremeter
- Radioactive well logging
- Shear wave velocity required system
- Dilatometer



# Outline

1. 해상풍력발전기 지지구조물 개요

2. 해상풍력 기초 설계기준 및 일반사항

**3. 해상풍력 기초 종류별 설계 방법**

4. 수치해석 및 모형실험 연구

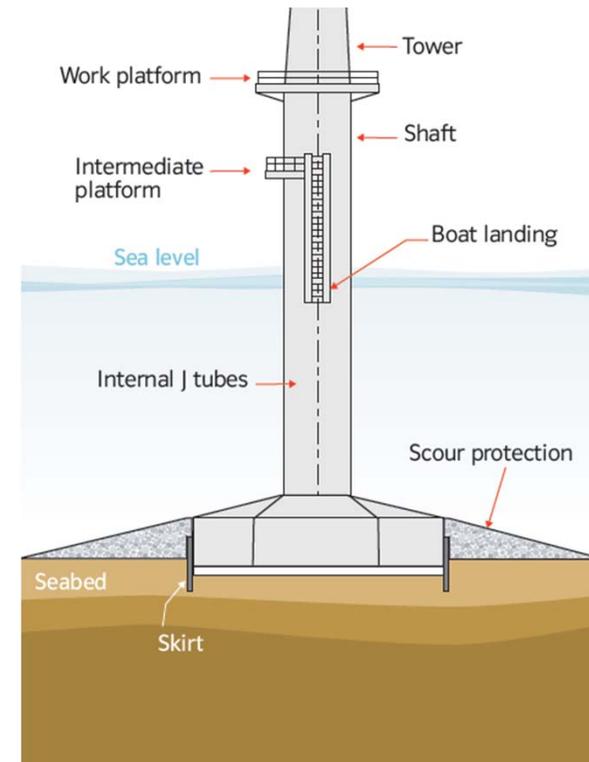




## 중력식 기초(Gravity base foundation)

- 중력식 기초 설계시 고려사항

- Tilting (eccentricity of load / gapping joint)
- Bearing capacity failure
- Sliding
- Buoyancy
- Settlement
- Dynamic behavior
- Soil liquefaction
- Hydraulic instability
- Scour





## 중력식 기초(Gravity base foundation)

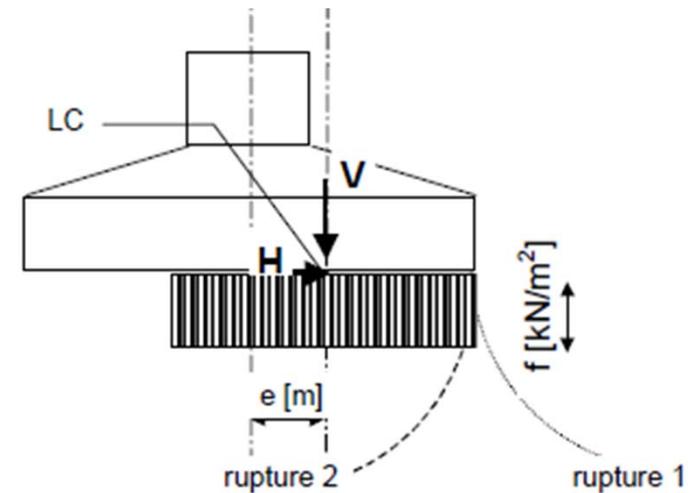
- 실무적으로 **DNV 기준(DNV-OS-J101)**을 주로 사용함
- 극한한계상태(ULS, Ultimate Limit State)에 대한 검토

### ① 중력식 기초에 작용하는 하중 (DNV)

- 풍력발전기 상부구조물을 통해서 또는 기초에 직접 전달된 하중들은 기초저면과 지반 사이의 경계면에 수직력 총합과 수평력 총합의 조합으로 각각 전달됨
- 하중작용점: 수직력과 수평력이 기초저면과 지반의 경계면에서 교차하는 점으로 정의됨
- 편심거리:

$$e = \frac{M_d}{V_d}$$

여기서,  $M_d$  는 기초-지반 경계면에서의 전도모멘트를 의미함





## 중력식 기초(Gravity base foundation)

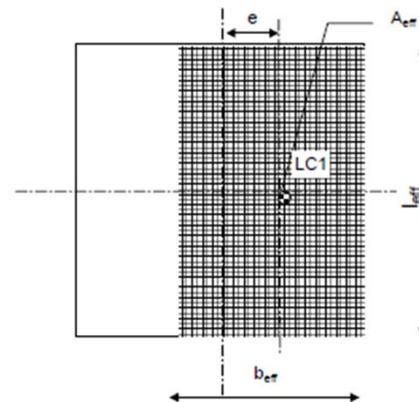
### ② 기초의 유효면적 (Effective foundation area) (DNV)

- 중력식 기초의 지지력 검토 시 유효면적의 개념이 사용됨
- 평면상에서 하중 편심이 없거나 무시할 수 있을 만큼의 편심을 가지고 있다면 유효면적은 실제 기초의 평면적과 동일하게 간주할 수 있음
- 기초의 유효면적은 유효폭( $b_{eff}$ )과 길이( $l_{eff}$ )의 곱으로 면적을 구함

$$A_{eff} = b_{eff} \cdot l_{eff}$$

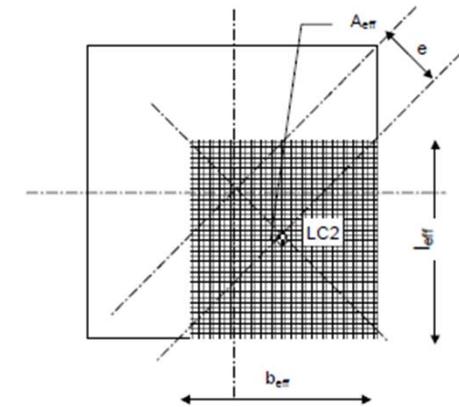
- 하중편심이 하나의 축에 대해서만 작용하는 경우 유효폭

$$b_{eff} = b - 2e, l_{eff} = b$$



- 하중편심이 2개의 축 모두에 존재하는 경우

$$b_{eff} = l_{eff} = b - e\sqrt{2}$$





## 중력식 기초(Gravity base foundation)

- 해상풍력발전 시설의 경우, 기초구조물의 기하학적 특성이 대부분 원형이나 다각형으로 제작됨
- 두 축 이상의 대칭축을 가지는 기초평면(정육각형, 정팔각형 등)에 대해서는 다음의 원형기초 유효면적 계산식을 적용할 수 있음

- 반지름 R을 가지는 원형 기초는 타원형태의 유효면적을 갖음

$$A_{eff} = 2 \left[ R^2 \arccos\left(\frac{e}{R}\right) - e\sqrt{R^2 - e^2} \right]$$

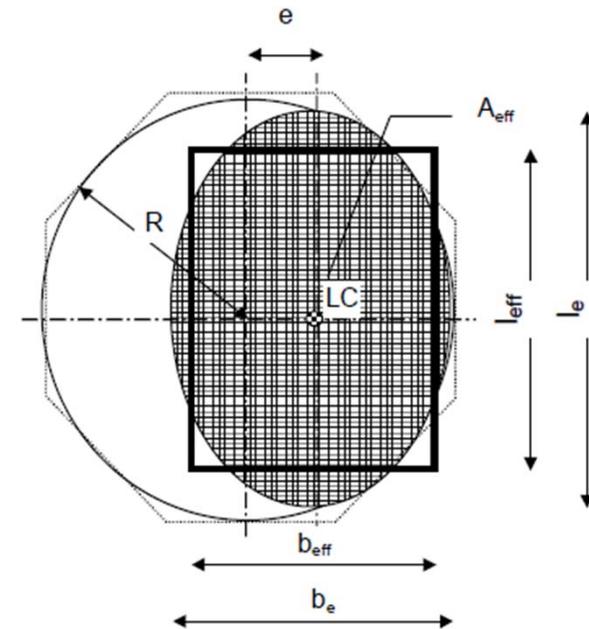
- 주축에 대한 편심으로 계산되는 유효폭( $b_e$ )과 유효길이( $l_e$ )

$$b_e = 2(R - e)$$

$$l_e = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{b_e}{2R}\right)^2}$$

- 타원형태의 유효면적( $A_{eff}$ )은 등가의 직사각형으로 고려할 수 있음

$$l_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{l_e}{b_e}} \quad \text{and} \quad b_{eff} = \frac{l_{eff}}{l_e} b_e$$





## 중력식 기초(Gravity base foundation)

### ③ 지지력에 대한 검토 (DNV)

#### - 배수조건일 때 지지력에 대한 검토

$$q_d = \frac{1}{2} \gamma' b_{eff} N_r s_r i_r + p_0' N_q s_q i_q + c_d N_c s_c i_c$$

#### - 비배수 조건( $\phi=0$ condition)일 때 지지력에 대한 검토

$$q_d = s_{ud} N_c^0 s_c^0 i_c^0 + p_0$$

여기서,

$q_d$ : 기초의 설계 지지력

$\gamma'$ : 지반의 유효단위중량(수중단위중량)

$p_0'$ : 지반과 기초저면이 접하는 위치에서의 유효 상재압

$c_d$ : 예상 파괴면 깊이에서 구한 점착력

$s_{ud}$ : 예상 파괴면의 깊이에서 구한 비배수 전단강도

$b_{eff}$ : 유효기초폭

$N_r, N_q, N_c$ : 지지력 계수

$s_r, s_q, s_c$ : 형상 계수

$i_r, i_q, i_c$ : 경사 계수

※ 한계상태 설계법에 따라 지지력 공식에 사용되는 전단강도 정수들은 강도계수를 적용하여 다음과 같이 계산됨

$$s_{ud} = \frac{s_u}{\gamma_M}$$

$$c_d = \frac{c}{\gamma_M}$$

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\tan(\phi)}{\gamma_M}\right)$$

✓ 재료에 대한 안전계수,  $\gamma_m$  (DNV, 2011)

Type of geotechnical analysis	Limit state	
	ULS	SLS
Effective stress analysis	$\gamma_M$	$\gamma_M$
Total stress analysis	1.15	1.0
	1.25	1.0



# 중력식 기초(Gravity base foundation)

• 지지력계수 (N)

$$N_r = 2(N_q + 1) \tan \phi_d \rightarrow \text{Vesic (1973) / API WSD}$$

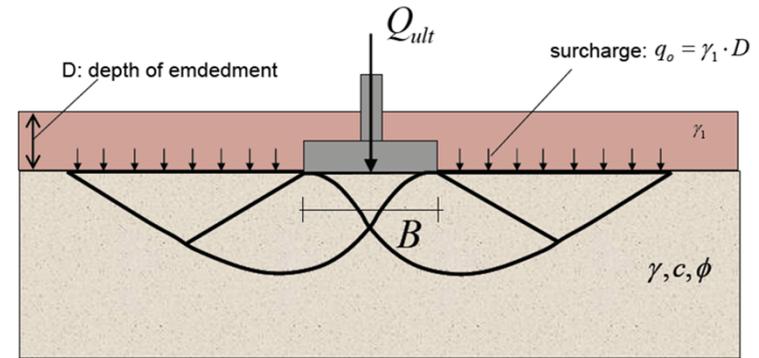
$$N_q = e^{\pi \tan \phi_d} \frac{1 + \sin \phi_d}{1 - \sin \phi_d}; N_c = (N_q - 1) \cot \phi_d; N_r = \frac{3}{2}(N_q - 1) \tan \phi_d \rightarrow \text{Hansen (1970) ISO}$$

• 형상계수 (s)

$$s_r = 1 - 0.4 \frac{b_{eff}}{l_{eff}}; s_q = s_c = 1 + 0.2 \frac{b_{eff}}{l_{eff}}$$

• 경사계수 (i)

$$i_q = i_c = \left[ 1 - \frac{H_d}{V_d + A_{eff} c_d \cot \phi_d} \right]^2; i_r = i_q^2$$



$$F_{ci} = \left( 1 - \frac{\alpha}{90^\circ} \right)^2 \quad \text{Meyerhof (1963)}$$

• 비배수 조건의 경우 ( $\phi=0$  condition)

$$N_c^0 = \pi + 2$$

$$s_c^0 = s_c$$

$$i_c^0 = 0.5 + 0.5 \sqrt{1 - \frac{H}{A_{eff} c_{ud}}}$$

ISO, API → 원형 및 정사각형 기초  $N_c = 6.17$



## 중력식 기초(Gravity base foundation)

- 과도한 편심하중을 받는 경우(extremely eccentric loading) → **DNV만 해당함**  
편심거리가 기초폭의 30%를 넘는( $e > 0.3b$ ) 과도한 편심하중이 작용하는 경우에는 추가적으로 제안된 식으로 지지력을 계산함

$$q_d = \gamma' b_{eff} N_r s_r i_r + c_d N_c s_c i_c (1.05 + \tan^3 \phi)$$

여기서 경사계수는

$$i_q = i_c = 1 + \frac{H}{V + A_{eff} c \cot \phi} ; i_r = i_q^2$$

$$i_c^0 = \sqrt{0.5 + 0.5 \sqrt{1 + \frac{H}{A_{eff} c_{ud}}}} \quad (\text{비배수 조건의 경사계수})$$

※ 기초의 지지력은 일반적인 경우와 과도한 편심하중을 받는 경우의 계산식 결과 중 작은 값을 사용함



## 중력식 기초(Gravity base foundation)

### ④ 활동저항에 대한 검토 (DNV)

- 기초가 수평력을 받는 경우, 활동에 대한 검토를 수행해야 함
- 배수조건의 경우

$$H < A_{eff} c + V \tan \phi$$

- 비배수 조건( $\phi=0$  condition)의 경우

$$H < A_{eff} c_{ud}$$

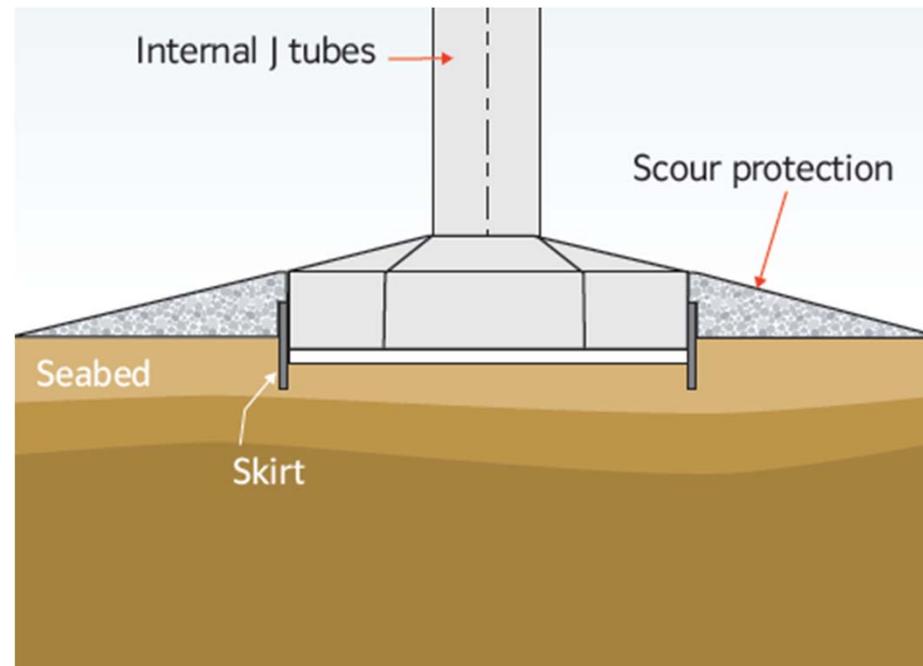
→ 또한 위의 식들을 적용할 때에는 반드시 다음 조건이 만족되어야 함

$$\frac{H}{V} < 0.4$$



## 중력식 기초(Gravity base foundation)

- Skirt 고려방법: 중력식 기초 설계시 고려사항 (DNV)
  - Skirt가 부착된 중력식 기초 설계시, 저면은 스커트 선단이라고 가정함
  - 석션으로 관입된 버킷 기초의 경우, 관입 후에는 중력식 기초로 설계
  - 스커트가 연직 및 수평 지지력에 미치는 영향을 고려하라고 기술되었으나 그 방법은 제시되지 않음





## 중력식 기초(Gravity base foundation)

- 안정성에 대한 검토 (API-WSD)

Failure Mode	Safety Factor
Bearing Failure	2.0
Sliding Failure	1.5



## 중력식 기초(Gravity base foundation)

- 사용한계상태(SLS, Serviceability Limit States)에 대한 검토
  - DNV 설계기준에는 침하나 변위에 대한 고려사항은 기술되어 있지만, **이에 대한 기준은 제시되지 않았음**
  - 따라서 설계자가 별도로 기준을 제시하여야 함
  - 사용한계상태(SLS)에 대한 검토를 수행할 경우, 하중계수(load factor,  $\gamma_M$ )는 1을 적용함
  - 일반적인 고려사항은 다음과 같음
    - 1차 압밀 및 2차 압밀에 의한 침하
    - 부등 침하
    - 수평 영구변위
    - 동적변화에 대한 거동

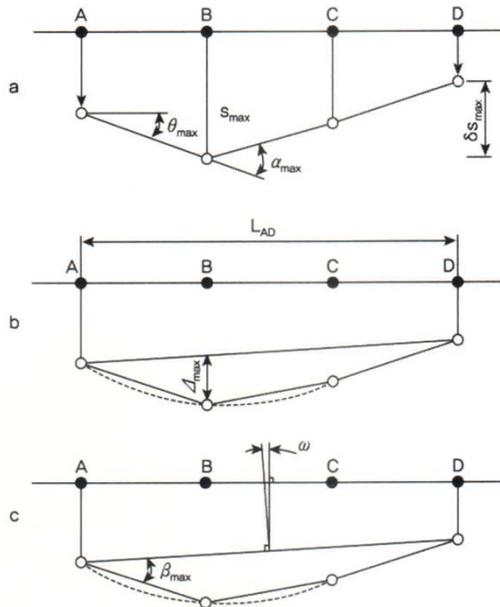


## 중력식 기초(Gravity base foundation)

※ Eurocode 7(EN 1997-1)에 기술된 처짐, 변위, 침하의 정의를 인용함

### ① 침하에 대한 기준

- 보통 크기의 구조물을 지지하고 있는 독립기초의 전체 침하량은 50mm까지 허용하는 것이 대부분임
- 전체침하는 부등침하와 달리 구조물의 사용성에 큰 영향을 끼치지 않음
- 기초구조물에서 발생할 수 있는 변위에 대한 정의는 다음과 같음



- a) 전체 침하량  $s$ , 부등침하  $\delta s$ , 회전각  $\theta$  및 각변형  $\alpha$ 에 대한 정의
- b) 상대처짐량  $\Delta_{max}$  및 길이에 대한 처짐률  $\Delta_{max}/L$ 에 대한 정의
- c) 기울임  $\omega$  및 상대 회전각(각 변위)  $\beta$ 에 대한 정의

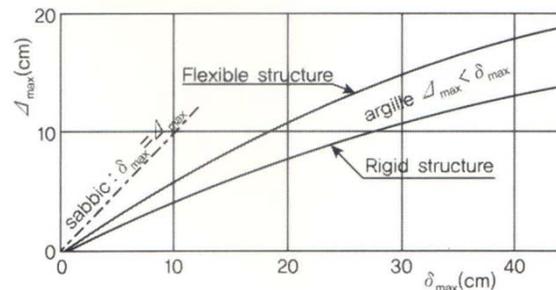
기초구조물에 발생하는 변위의 종류 (Bjerrum, 1963)



## 중력식 기초(Gravity base foundation)

### ② 침하 검토 방법

- 결정론적인 방법: 유한요소법 또는 지반반력계수를 이용하여 지반-기초구조물 상호작용 해석을 수행한 결과 (응력, 변위)를 통해 침하량을 결정함
- 반결정론적인 방법: 우선 최대변위(침하량,  $\delta_{max}$ )를 계산한 다음, 아래 그림과 같은 상관관계도(Bjerrum, 1963)를 이용하여 최대변위에 상응하는 부등침하량( $\Delta_s$ )을 구함



전체 침하량과 부등침하 간의 경험적 상관관계(Bjerrum, 1963)

### • 비점성토(사질토)의 경우 전체침하량

$$\omega = pb f / E_m$$

$E_m$ : 설계 탄성계수

$f$ : 침하 영향계수 =  $c_f(1-v^2)$

$p$ : 기초저면의(평균) 접지압

$b$ : 기초폭

$c_f$ : 기초형태와 강성에 따른 계수

L/B		1	2	3	5	10
강성기초		0.88	1.21	1.43	1.72	2.18
연성기초	가장자리	0.56	0.76	0.89	1.05	1.27
	중심	1.12	1.53	1.78	2.10	2.58

### • 점성토의 경우, 1차원 압밀론을 적용하여 전체 침하량을 계산함



# 중력식 기초(Gravity base foundation)

## ● 동적해석

- 동적해석 수행 시, 지반-구조물 상호작용을 고려해야 함
- 균질한 지반일 경우, 등가 스프링 계수 사용가능
- 비균질 지반에서는 유한요소해석 또는 이와 유사한 검증된 방법 사용
- 특히 흙의 비선형성과 내부 감쇠비를 산정하기 위하여 매개변수 연구를 수행할 것을 권장함

**Table G1 Circular footing on stratum over bedrock or on stratum over half space**

	On stratum over bedrock	On stratum over half space
<b>Mode of motion</b>	<b>Foundation stiffness</b>	<b>Foundation stiffness</b>
Vertical	$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H}\right)$	$K_v = \frac{4G_1 R}{1-\nu_1} \frac{1 + 1.28 \frac{R}{H}}{1 + 1.28 \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}}; 1 \leq H/R \leq 5$
Horizontal	$K_h = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H}\right)$	$K_h = \frac{8G_1 R}{2-\nu_1} \frac{1 + \frac{R}{2H}}{1 + \frac{R}{2H} \frac{G_1}{G_2}}; 1 \leq H/R \leq 4$
Rocking	$K_\alpha = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H}\right)$	$K_\alpha = \frac{8G_1 R^3}{3(1-\nu_1)} \frac{1 + \frac{R}{6H}}{1 + \frac{R}{6H} \frac{G_1}{G_2}}; 0.75 \leq H/R \leq 2$
Torsion	$K_t = \frac{16GR^3}{3}$	Not given

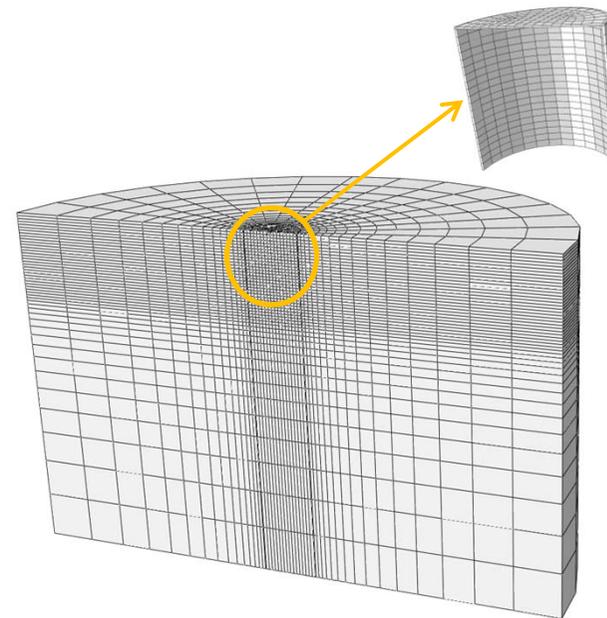
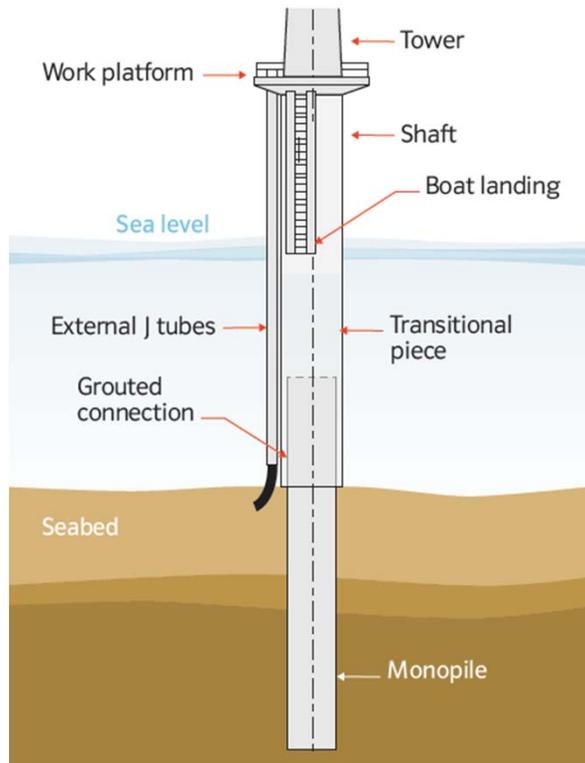
**Table G2 Circular footing embedded in stratum over bedrock**

<b>Mode of motion</b>	<b>Foundation stiffness</b>
Vertical	$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H}\right) \left(1 + \frac{D}{2R}\right) \left(1 + (0.85 - 0.28 \frac{D}{R}) \frac{D}{H}\right)$
Horizontal	$K_h = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H}\right) \left(1 + \frac{2D}{3R}\right) \left(1 + \frac{5D}{4H}\right)$
Rocking	$K_\alpha = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H}\right) \left(1 + 2 \frac{D}{R}\right) \left(1 + 0.7 \frac{D}{H}\right)$
Torsion	$K_t = \frac{16GR^3}{3} \left(1 + \frac{8D}{3R}\right)$



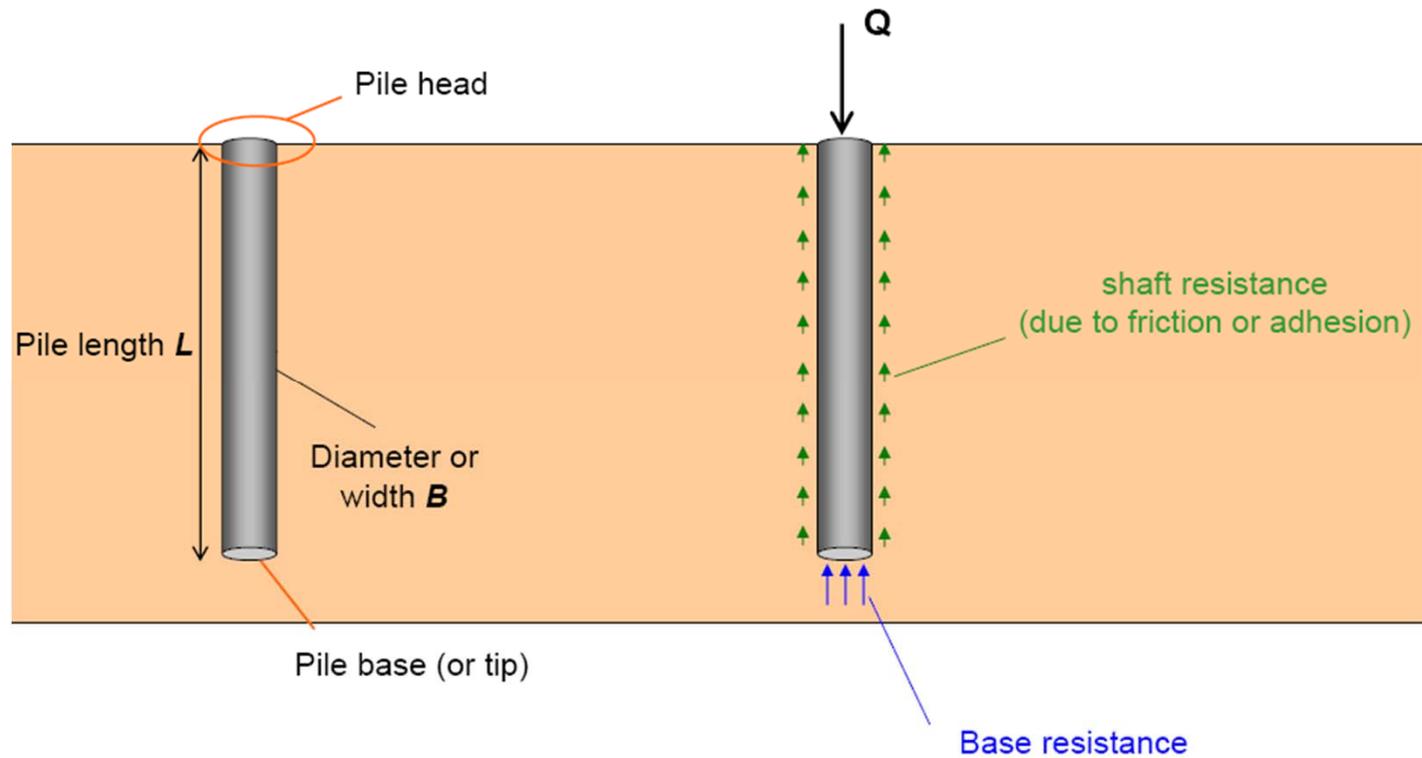
## 모노파일 기초(Monopile)

- 모노파일이란?
  - Mono-pile vs. 버킷기초 (Skirted foundation)



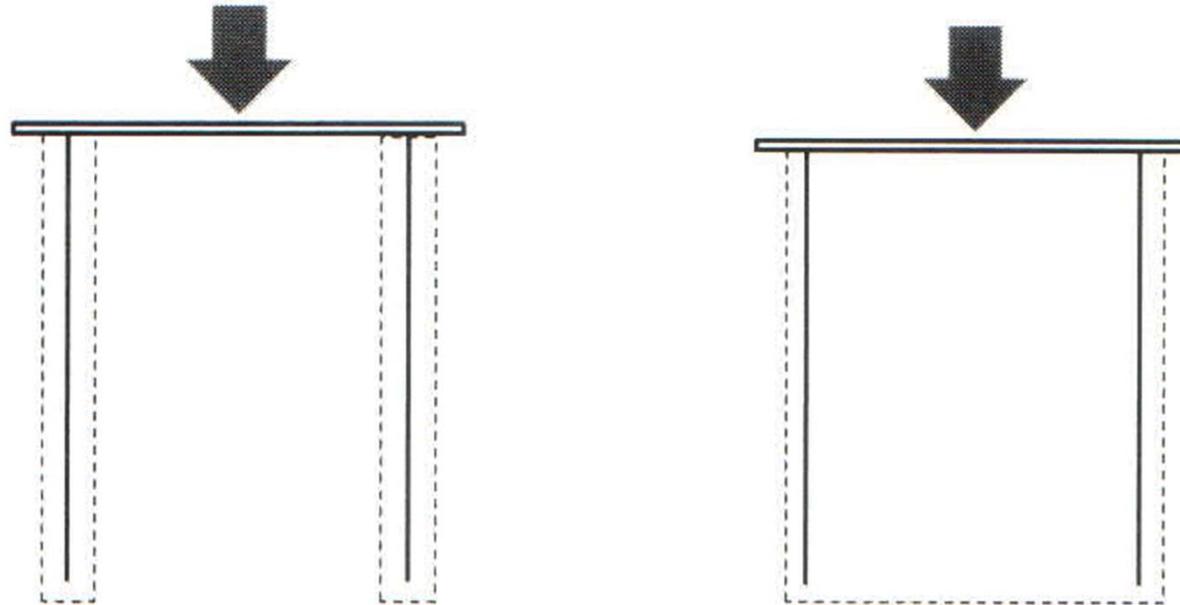


# 말뚝의 지지 메카니즘





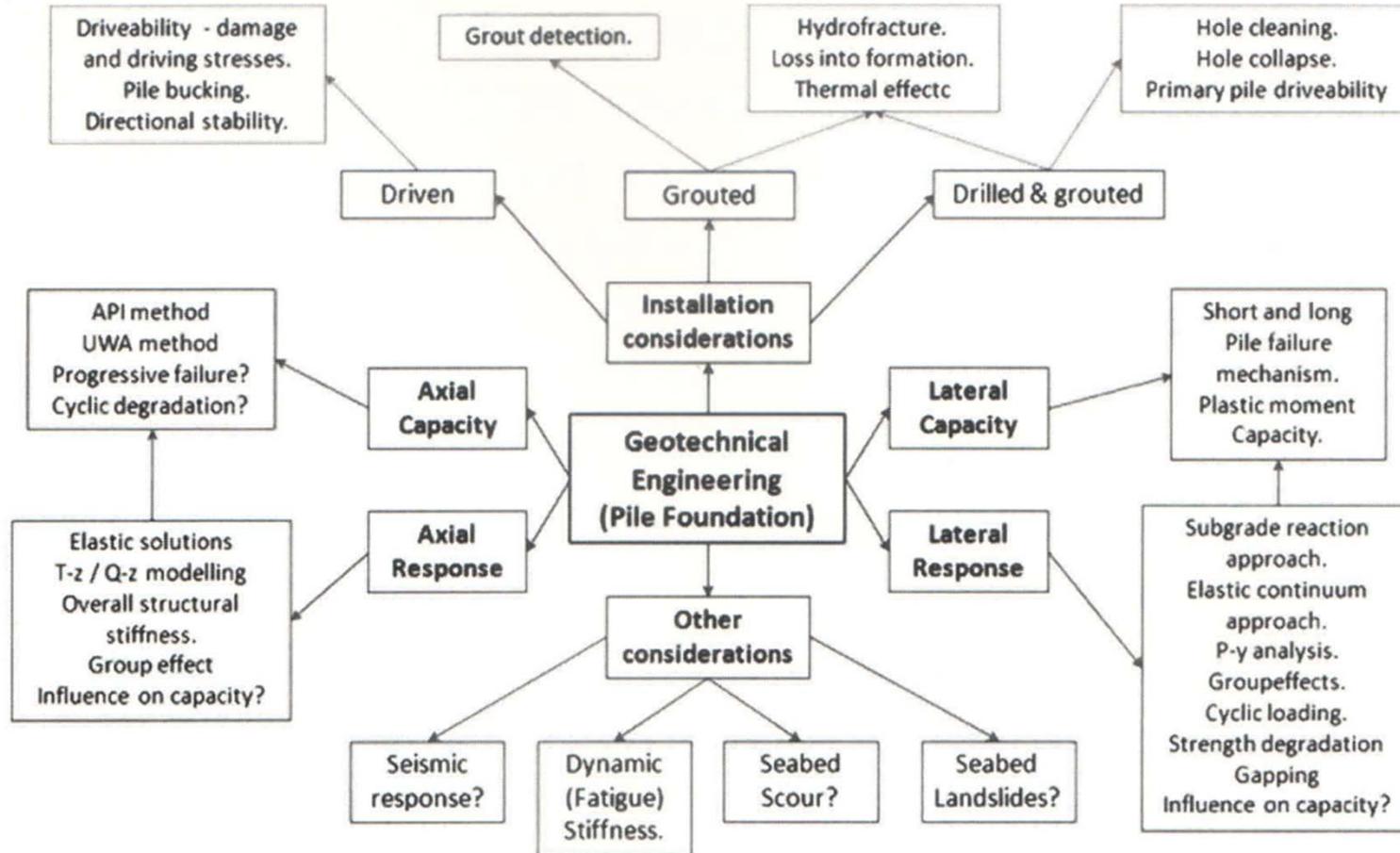
## 버킷기초의 지지 메카니즘





## 모노파일 기초(Monopile)

- 모노파일 기초 설계시 고려사항



해상풍력 기초설계 시 고려사항(Randolph and Gourvenec, 2011)



## 모노파일 기초(Monopile)

- 해외 설계기준 중 API, DNV, ISO 기준은 말뚝기초의 설계방법에 대하여 자세하게 기술됨
  - ISO-19902, API RP 2A-LRFD, DNV-OS-J101 → 한계상태 설계법
  - API RP 2A-WSD → 허용응력 설계법
- 다양한 환경하중 조건과 상부구조물의 운영상태에 따른 설계하중조건(DLCs)을 만족시킬 수 있는 말뚝의 지지력을 확보하기 위해 말뚝기초의 규격(직경, 길이, 두께)가 결정되어야 함
- 설계 수명 기간동안 영구 변형(침하, 수평변위, 회전변위)에 대한 안정성 확보 여부가 검토되어야 함



## 모노파일 기초(Monopile)

- 모노파일 기초 설계시 고려사항
  - 연직지지력(Axial capacity)
  - 연직변위(Axial response)
  - 수평지지력(Lateral capacity)
  - 수평변위(Lateral response)
  - 시공조건(말뚝 항타분석, 공벽안정성 및 그라우팅)
  - 내진 설계
  - 해저면 안정성
  - 세굴



## 모노파일 기초(Monopile)

- 모노파일 기초 설계 접근 방법
- API /ISO
  - 지지력 (연직, 수평)
  - 변위 (연직, 수평)
- DNV
  - ULS
    - 연직 하중
      - 연직 지지력으로 평가 → 반복하중으로 인한 강도 저하 고려 (반복하중은 점성토, 실트에서 중요하며 중간 이상의 상대밀도를 가진 사질토에서는 영향이 적음)
    - 복합하중 (수평 및 모멘트 하중)
      - 수평 지지력으로 평가
      - 허용변위 초과 여부 → p-y & t-z curve가 적용된 Single pile analysis로 예측 / 해석시 수직 하중 반드시 적용



## 모노파일 기초(Monopile)

- 모노파일 기초 설계 접근 방법
- DNV
  - SLS
    - 반복하중 작용시 누적되는 영구변위를 하중재하횟수의 함수로 평가
    - 일반적으로 허용변위는 말뚝 두부(Seabed)의 허용 회전각으로 제시됨
    - 허용변위는 터빈 제작자가 규정함
    - 허용변위는 설치허용변위와 누적영구변위의 합으로 계산함



## 모노파일 기초(Monopile)

- 연직지지력 산정 방법 (API RP 2A-WSD 기준)

- 모노파일의 연직하중에 대한 극한지지력은 일반적인 말뚝기초와 동일한 산정식을 사용함
- 허용지지력 산정을 위한 안전율은 하중조건에 따라 1.5~2.0을 적용함

$$Q_d = Q_f + Q_p = f A_s + q A_p$$

여기서,

$Q_f$ : 말뚝의 주면지지력(kN)

$Q_p$ : 말뚝의 선단지지력(kN)

$f$ : 극한단위 주면지지력(kPa)

$A_s$ : 말뚝의 외주면적(m<sup>2</sup>)

$q$ : 말뚝의 극한단위 선단지지력(kPa)

$A_p$ : 말뚝의 선단면적(m<sup>2</sup>)

✓ 하중조건별 말뚝의 최소 안전율 (API, 2007)

하중조건	안전율
1. Design environmental conditions with appropriate drilling loads	1.5
2. Operating environmental conditions during drilling operations	2.0
3. Design environmental conditions with appropriate producing loads	1.5
4. Operating environmental conditions during producing operations	2.0
5. Design environmental conditions with minimum load(for pullout)	1.5



## 모노파일 기초(Monopile)

- 연직지지력 산정 방법 (ISO-19902 , DNV-OS-J10 기준)

$$Q_d = Q_f + Q_p = f A_s + q A_p$$

$$R_d \geq Q_d$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k$$

$$Q_d = \gamma_f Q_k$$

✓ 재료에 대한 안전계수,  $\gamma_m$  (DNV, 2011)

Type of geotechnical analysis	Limit state	
	ULS	SLS
	$\gamma_M$	$\gamma_M$
Effective stress analysis	1.15	1.0
Total stress analysis	1.25	1.0

여기서,

$R_d$  = 설계 저항,  $Q_d$  = 설계 하중력,  $\gamma_m$  = 재료에 대한 부분안전계수,

$f_k$  = 재료 특성값,  $\gamma_f$  = 하중 계수,  $Q_k$  = 하중 특성값



# 모노파일 기초(Monopile)

## ① 주면지지력 산정식

### • 점성토 지반 (API, ISO)

$$f = \alpha \cdot c \quad \alpha = \frac{1}{2\sqrt{c/p'_o}} : c/p'_o \leq 1.0 \text{인 경우}$$

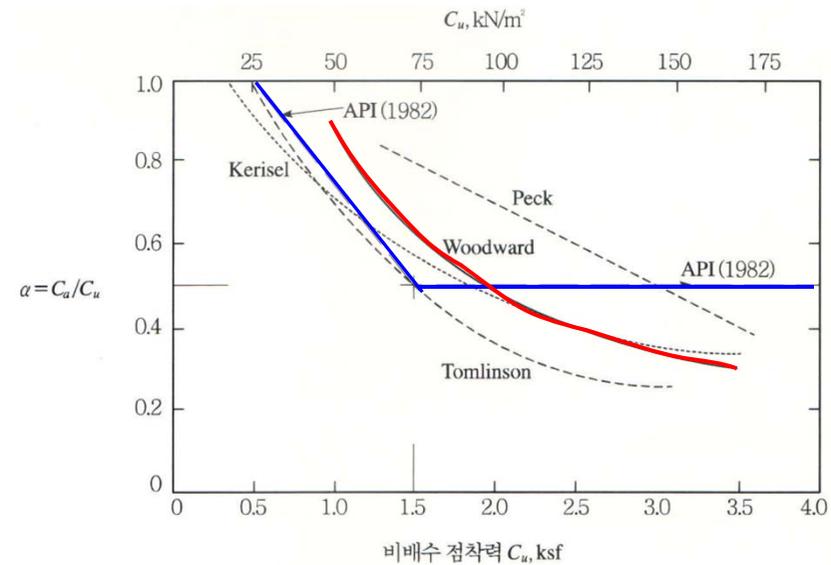
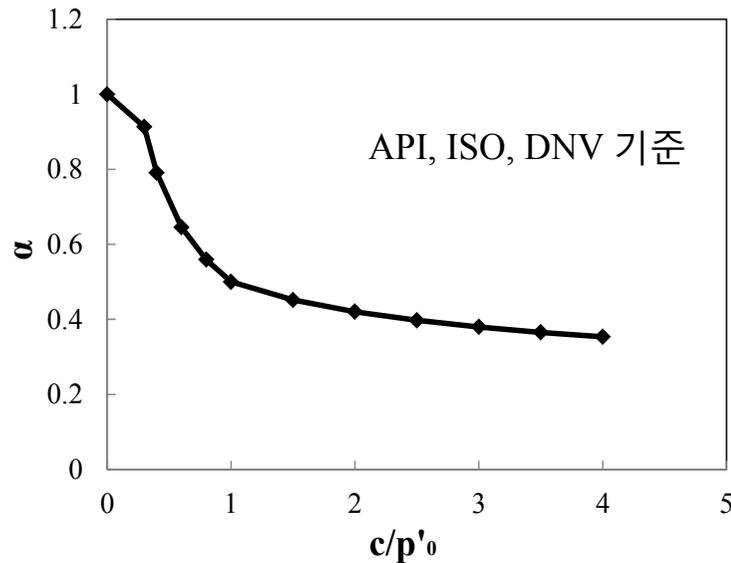
$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt[4]{c/p'_o}} : c/p'_o \geq 1.0 \text{인 경우}$$

여기서,

$\alpha$ : 무차원 계수

$c$ : 지반의 비배수 전단강도

$p'_o$ : 유효상재압



구조물 기초 설계기준 해설(2009) - 타입말뚝의 부착력 계수( $\alpha$ )

- 점토층의 굳기, 말뚝종류, 크기, 시공법, 지층상태 등에 따라 값이 달라짐
- 육상말뚝: Woodward(1961)
- 해상 강관말뚝: API(1982)



## 모노파일 기초(Monopile)

- 점성토 지반 (DNV)

- ▶  $\alpha$  method (total stress method)

$$f = \alpha \cdot c$$

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt{c/p'_0}} : c/p'_0 \leq 1.0 \text{인 경우}$$

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt[4]{c/p'_0}} : c/p'_0 \geq 1.0 \text{인 경우}$$

- ▶  $\beta$  method (effective stress method)

$$f = \beta p'_0$$

여기서,  $\beta = 0.1 \sim 0.25$

- ▶  $\lambda$  method (semi-empirical method)

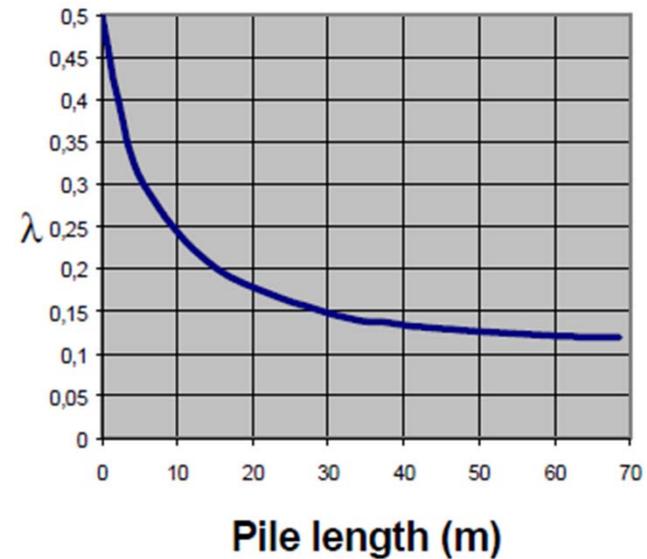
$$f = \lambda (p'_{0m} + 2s_{um})$$

여기서,

$\lambda$  = 파일 깊이에 따른 상수

$p'_{0m}$  = 파일이 설치된 깊이까지의 평균 유효상재압

$s_{um}$  = 파일이 설치된 깊이까지의 평균 비배수전단강도



파일길이에 따른  $\lambda$  값 (DNV, 2011)



# 모노파일 기초(Monopile)

## ① 주면지지력 산정식

- 사질토 지반 (API, ISO)

$$f = \beta \cdot p'_o$$

여기서,

$\beta$ : 무차원 계수

$p'_o$ : 유효상재압

→ 표에 제시된  $\beta$  값은 open-ended 말뚝인 경우  
이며, closed-ended의 경우에는 25% 증가  
 하여 적용

$$\beta = \tan \delta$$

Relative density <sup>a</sup>	Soil classification <sup>b</sup>	Skin friction factor $\beta$	Limiting unit skin friction values $f$ kPa (kips/ft <sup>2</sup> )	End bearing factor $N_q$	Limiting unit end bearing values $q$ MPa (kips/ft <sup>2</sup> )
Very loose	Sand	Not applicable <sup>d</sup>	Not applicable <sup>d</sup>	Not applicable <sup>d</sup>	Not applicable <sup>d</sup>
Loose	Sand				
Loose	Sand-silt <sup>c</sup>				
Medium dense	Silt				
Dense	Silt				
Medium dense	Sand-silt <sup>c</sup>	0,29 (16)	67 (1,4)	12	3 (60)
Medium dense	Sand	0,37 (20)	81 (1,7)	20	5 (100)
Dense	Sand-silt <sup>c</sup>				
Dense	Sand	0,46 (25)	96 (2,0)	40	10 (200)
Very dense	Sand-silt <sup>c</sup>				
Very dense	Sand	0,56 (29)	115 (2,4)	50	12 (250)

The parameters listed in this table are intended as guidelines only. Where detailed information such as *in situ* CPT records, strength tests on high quality samples, model tests or pile driving performance is available, other values are justified. Design values relate to the mid-point in each range of relative density.

<sup>a</sup> The following soil definitions for relative density descriptions are applicable:

Soil description	Relative density (%)
Very loose	0-15
Loose	15-35
Medium dense	35-65
Dense	65-85
Very dense	85-100

<sup>b</sup> Soil classifications are according to ISO 19901-4.

<sup>c</sup> Sand-silt includes soils with significant fractions of both sand and silt. Strength values generally increase with increasing sand fractions and decrease with increasing silt fractions.

<sup>d</sup> Design parameters for these relative density/soil description combinations, given in previous API RP2A documents (see the Bibliography), can be unconservative. Hence CPT-based methods should be used for these soils (see A.17.4.4).



## 모노파일 기초(Monopile)

- 사질토 지반 (DNV)

$$f = K p'_o \tan \delta \leq f_l$$

여기서,

$K$ : 무차원 계수

$p'_o$ : 유효상재압

$\delta$ : 파일과 지반사이 마찰각

$f_l$ : 최대 주면마찰력

$K = 0.8$  (open-ended pile)

$K = 1$  (closed-ended pile)

Density	Soil description	$\delta$ (degrees)	$f_l$ (kPa)	$Nq$ (—)	$q_1$ (MPa)
Very loose Loose Medium	Sand Sand-silt <sup>2)</sup> Silt	15	48	8	1.9
Loose Medium Dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup> Silt	20	67	12	2.9
Medium Dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup>	25	81	20	4.8
Dense Very dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup>	30	96	40	9.6
Dense Very dense	Gravel Sand	35	115	50	12.0

1) The parameters listed in this table are intended as guidelines only. Where detailed information such as in-situ cone penetrometer tests, strength tests on high quality soil samples, model tests or pile driving performance is available, other values may be justified.

2) Sand-silt includes those soils with significant fractions of both sand and silt. Strength values generally increase with increasing sand fractions and decrease with increasing silt fractions.



## 모노파일 기초(Monopile)

### ② 선단지지력 산정식 (API, ISO, DNV)

#### • 점성토 지반

$$q = 9 \cdot c$$

여기서,

$c$ : 지반의 비배수 전단강도

#### • 사질토 지반

$$q = N_q \cdot p'_o$$

여기서,

$N_q$ : 무차원 선단지지력 계수

$p'_o$ : 유효상재압

#### ✓ 선단지지력 계수 $N_q$ (API, ISO)

Relative density <sup>a</sup>	Soil classification <sup>b</sup>	End bearing factor $N_q$	Limiting unit end bearing values $q$ MPa (kips/ft <sup>2</sup> )
Very loose	Sand	Not applicable <sup>d</sup>	Not applicable <sup>d</sup>
Loose	Sand		
Loose	Sand-silt <sup>c</sup>		
Medium dense	Silt		
Dense	Silt		
Medium dense	Sand-silt <sup>c</sup>	12	3 (60)
Medium dense	Sand	20	5 (100)
Dense	Sand-silt <sup>c</sup>		
Dense	Sand	40	10 (200)
Very dense	Sand-silt <sup>c</sup>		
Very dense	Sand	50	12 (250)

#### ✓ 선단지지력 계수 $N_q$ (DNV)

Density	Soil description	$N_q$ (—)	$q_1$ (MPa)
Very loose Loose Medium	Sand Sand-silt <sup>2)</sup> Silt	8	1.9
Loose Medium Dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup> Silt	12	2.9
Medium Dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup>	20	4.8
Dense Very dense	Sand Sand-silt <sup>2)</sup>	40	9.6
Dense Very dense	Gravel Sand	50	12.0



## 모노파일 기초(Monopile)

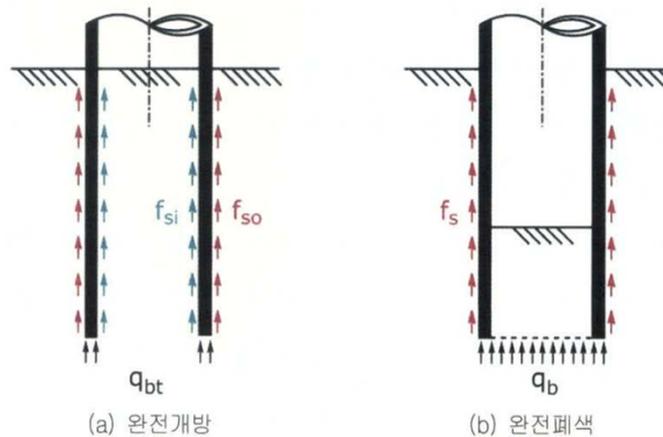
※ 말뚝의 선단지지력은 기초 내부 폐색정도에 따라 다르게 계산됨

✓ 완전 폐색조건(plugged condition)의 경우

: 말뚝 선단 전체면적에 대한 지지력을 산정함 ( $q_b$ )

✓ 개단조건(unplugged condition)의 경우

: 말뚝의 순단면적에 작용하는 선단지지력 ( $q_t$ ) + 말뚝 내측면의 주면지지력 ( $f_{si}$ )





# 버킷기초

## ① 연직 지지력

- 기초 저면의 순단면적만을 고려하는 경우

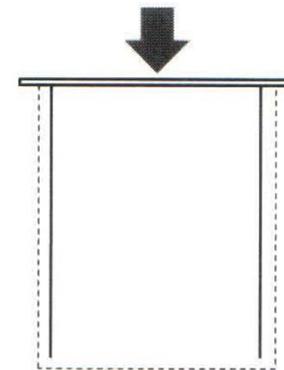
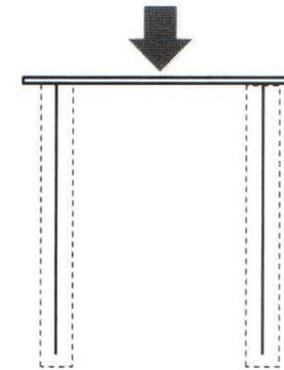
$$P_u = F_o + F_i + Q_{tip} - W_p$$

여기서,  $P_u$ : 연직 지지력,  $F_o$ : 외부 주면마찰력,  $F_i$ : 내부 주면마찰력  
 $Q_{tip}$ : 선단 지지력,  $W_p$ : 상부 유효하중

- 기초 전체 면적을 고려하는 경우

$$P_u = F_o + Q_A - W_p - W_s$$

여기서,  $P_u$ : 연직 지지력,  $F_o$ : 외부 주면마찰력,  $Q_A$ : 선단 지지력  
 $W_p$ : 상부 유효하중,  $W_s$ : 석션 기초 내부 토사의 유효중량





# 버킷기초

## ② 인발 지지력

- 인발 지지력은 파괴형태에 따라 3가지로 구분할 수 있으며, 각 파괴형태에 따라 인발 지지력을 산정할 수 있음

Type 1	Type 2	Type 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>Local shear failure</li> <li>비교적 짧은 말뚝</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Local tension failure</li> <li>비교적 긴 말뚝</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>General shear failure</li> <li>높은 과압밀 점성토</li> </ul>

$$Type\ 1: Q_u = W_p + F_{out} + F_{in} + Q_{tip}$$

$$Type\ 2: Q_u = W_p + W_s + F_{out} + Q_{base}$$

$$Type\ 3: Q_u = \frac{\pi}{4} D_o^2 q_u + W_p + W_s$$

여기서,

$Q_{tip}, Q_{base}$  : 기초 선단에서의 흙의 인장저항력

$W_p, W_s$  : 파일과 내부흙의 무게

$F_{in}, F_{out}$  : 석션기초 내외부 마찰력

$q_u$  : ultimate reversed end bearing capacity



## 모노파일 기초(Monopile)

- 수평지지력 산정 방법

- 해상풍력 구조물의 경우 수직하중에 비해 수평하중이 크게 작용하므로 수평하중이 주요 인자로 작용하는 경우가 많음
- 정적 수평하중에 대한 극한단위수평지지력 ( $p_u$ )

- 점성토 지반 (API, ISO, DNV)

$$p_u = 3c + \gamma X + J \frac{cX}{D}$$

$$p_u = 9c, \quad X \geq X_R$$

$$X_R = \frac{6D}{\gamma D / c + J}$$

여기서,

$p_u$ : 극한지지력(kPa)

$c$ : 지반의 비배수 전단강도(kPa)

$D$ : 말뚝의 직경(mm)

$\gamma$ : 유효단위중량(MN/m<sup>3</sup>)

$J$ : 무차원 계수로써 경험적으로 0.25~0.5의 값을 갖음

$X$ : 지반면으로부터의 심도(mm)

$X_R$ : 지반면으로 저항력이 감소하는 곳까지의 깊이(mm)



## 모노파일 기초(Monopile)

- 사질토 지반 (API, ISO, DNV)

- 사질토 지반의 경우, 정적 수평하중에 대한 말뚝의 단위길이당 극한 수평지지력은 심도에 따라 두 가지의 식으로 산정할 수 있음
- 임의의 심도에서의  $p_u$  값은 2가지 값 중에서 **작은 값을 적용함**

$$p_{us} = (C_1 \times H + C_2 \times D) \times \gamma \times H : \text{shallow depth}$$

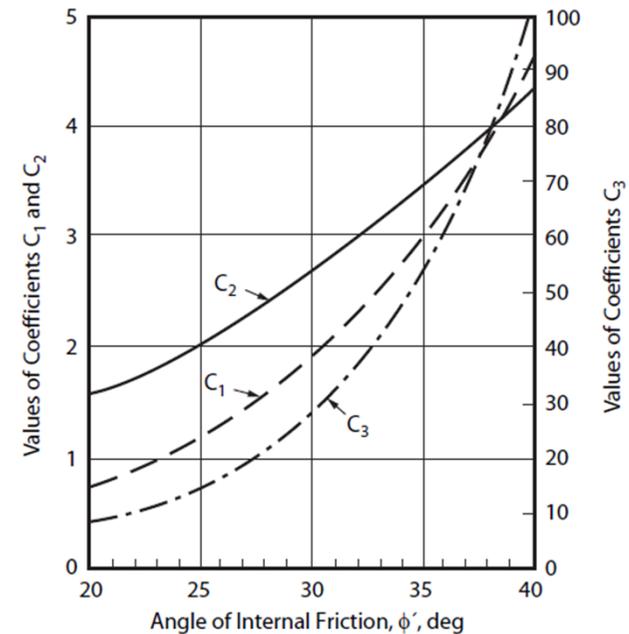
$$p_{ud} = C_3 \times D \times \gamma \times H : \text{deep depth}$$

여기서,

$\gamma$ : 유효 단위중량(kN/m<sup>3</sup>)

$H$ : 지반면으로부터의 심도 (m)

$C_1, C_2, C_3$ : 내부 마찰각에 따른 계수

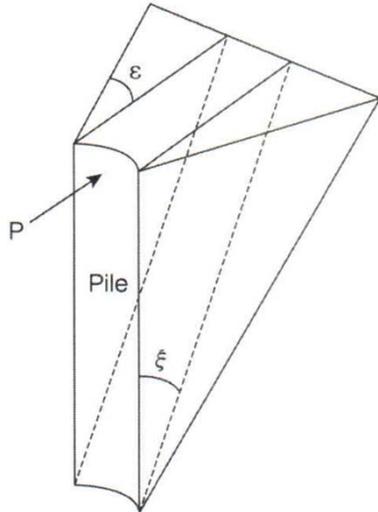


$C_1, C_2, C_3$  계수 산정 도표 (API, ISO, DNV)

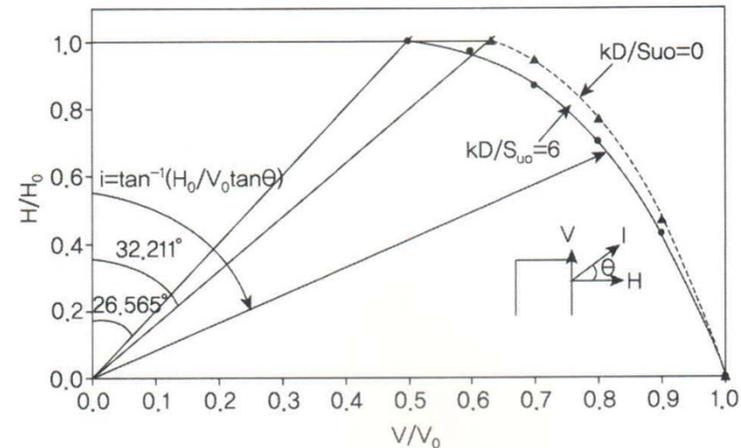


## 모노파일 기초(Monopile)

- 수평지지력 산정 방법 - 한계평형법 기반 (인발하중이 작용하는 석션 앵커)
  - 횡방향 지지력은 하중 작용에 의해 형성되는 흠뻐기를 가정하여 지지력을 평가하는 **한계평형법(limit equilibrium method)**으로 산정할 수 있음
  - 하중의 작용 방향에 따른 지지력은 기존 연구에서 제시한 횡방향 지지력과 인발 지지력의 사이 관계 도표를 이용하여 도출할 수 있음



횡방향 하중작용에 따른 흠뻐기 이론



횡방향-인발 지지력을 조합한 재하하중 방향에 따른 석션기초 지지력 도표 (Bang and Cho, 2000)

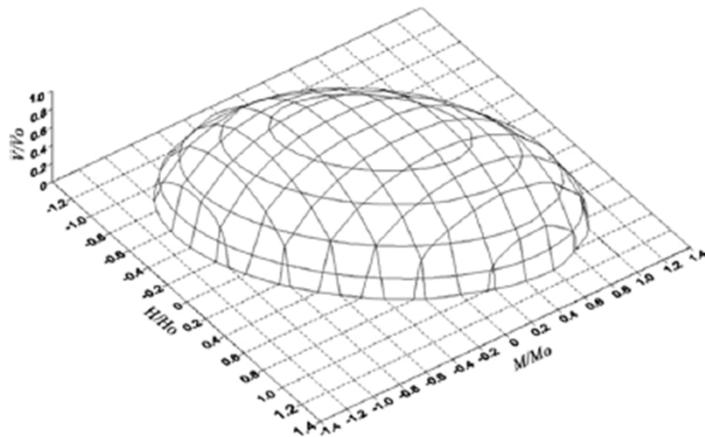


## 복합하중에 대한 지지력 - 버킷 기초

- 복합하중에 대한 지지력 (점성토)

- 최근 3차원 유한요소해석을 이용한 수직-수평-모멘트 하중 작용 시 버킷 기초의 지지력 산정에 관한 연구가 수행되고 있음
- 현재 비균질(non-homogeneous) 점성토 지반에서 설치된 버킷 기초의 복합하중 작용 시 지지력 산정할 수 있는 **항복 포락선(yield surface)**이 제시되었음
- Hung and Kim (2014): L/D: 0.25 ~ 1.0

$$f_{VHM} = \left(\frac{M}{M_0}\right)^2 - \alpha \beta \gamma \left(\frac{H}{H_0}\right) \left(\frac{M}{M_0}\right) + \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 - 1 = 0$$



비균질 점성토 지반에서의 항복포락선  
(Hung and Kim, 2014)

$$\alpha = 0.304 \left(\frac{L}{D}\right)^{0.33}$$

$$\beta = 5.58 \left(\frac{kD}{s_{um}}\right)^{-0.049} \leq 5.0$$

$$\lambda = 0.94 + 0.2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2.4}$$

- $V_o = N_{cV} A s_{uo}$

$$N_{cV} = 5.2 \left(\frac{L}{D}\right) + 5.1 + 2.7 e^{\left(-\frac{kD}{s_{um}} \times 0.35\right)}$$

- $H_o = N_{cH} A s_{uo}$

$$N_{cH} = 3.4 \left(\frac{L}{D}\right) + 0.54 + 2 e^{\left(-\frac{kD}{s_{um}} \times 0.34\right)}$$

- $M_o = N_{cM} A D s_{uo}$

$$N_{cM} = \left( e^{\left(-0.38 \times \frac{kD}{s_{um}}\right)} + 1.22 \right) \times 0.36 e^{\left(1.44 \times \frac{L}{D}\right)}$$

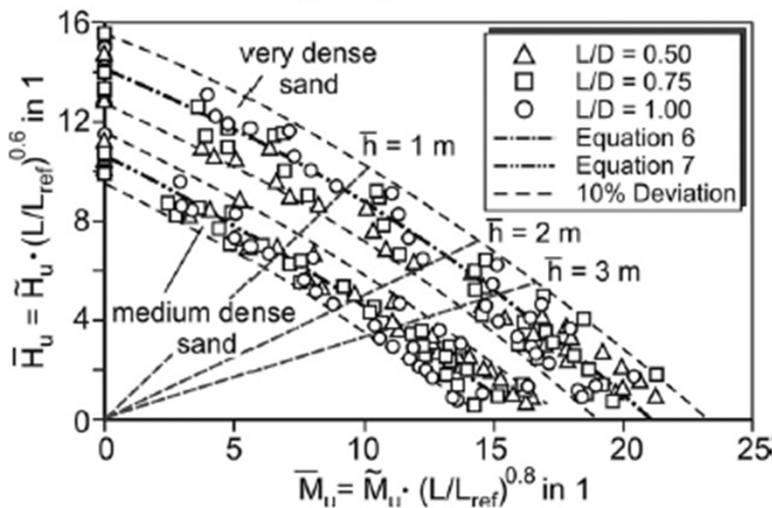


## 복합하중에 대한 지지력 - 버킷 기초

- 복합하중에 대한 지지력 (사질토)

- 3차원 유한요소해석을 이용한 수직-수평-모멘트 하중 작용 시 사질토 지반에 설치된 버킷 기초의 지지력을 산정할 수 있는 **항복포락선(yield surface)**이 제시되었음

- Achmus et al. (2013)
- 수직하중 10MN 작용 시



점성토 지반에서의 항복포락선  
(Achmus et al., 2013)

- 단일하중에 대한 지지력

$$\hat{H}_u = \frac{H_u}{\gamma' \cdot L^2 \cdot D} \quad \text{여기서, } \bar{H}_u = \hat{H}_u \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right)^{0.6}$$

$$\tilde{M}_u = \frac{M_u}{\gamma' \cdot L^3 \cdot D} \quad \bar{M}_u = \tilde{M}_u \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right)^{0.8}$$

- 복합하중에 대한 지지력

Very dense sand:

$$\bar{H}_u = -0.011 \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right) \cdot \bar{M}_u^2 - 0.43 \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right)^{0.2} \cdot \bar{M}_u + 14.1 \cdot \left(\frac{L_{ref}}{L}\right)^{0.6}$$

Medium dense sand:

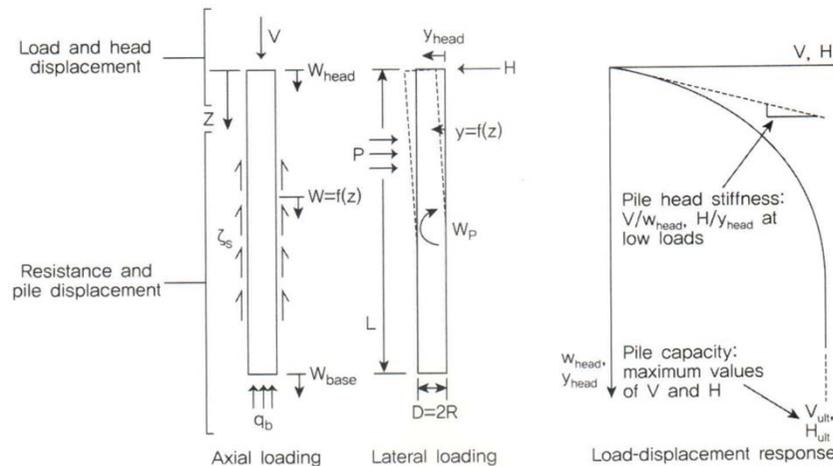
$$\bar{H}_u = -0.009 \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right) \cdot \bar{M}_u^2 - 0.50 \cdot \left(\frac{L}{L_{ref}}\right)^{0.2} \cdot \bar{M}_u + 10.5 \cdot \left(\frac{L_{ref}}{L}\right)^{0.6}$$



## 모노파일 기초(Monopile)

### ● 말뚝 변위 산정 방법

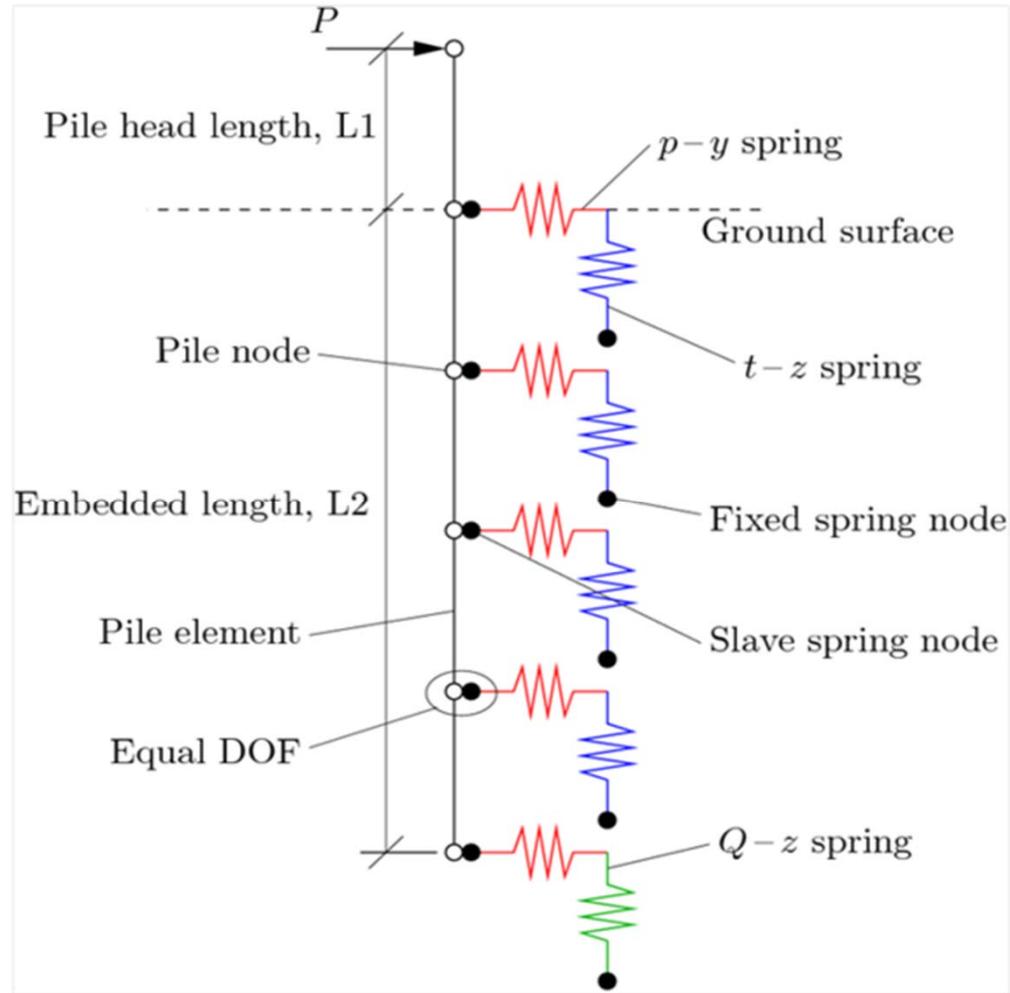
- 해상풍력기초는 연직하중(axial loading)과 수평하중(lateral loading) 등의 외력을 받게 되면 말뚝 머리와 선단부를 포함하여 말뚝의 각 지점에는 연직변위( $w$ )와 수평변위( $y$ )가 발생함
- 하중의 크기가 증가하면서 발생하는 변위는 **비선형적인 특성**을 나타냄
- 현재 말뚝기초 설계 시 말뚝의 연직변위 및 수평변위 산정을 위해서는 **하중전이(load transfer) 함수법**이 널리 사용됨
- API 기준 및 DNV 기준에서도 모노파일의 변위 산정 시 하중전이 곡선인 **t-z 곡선, q-z 곡선, p-y 곡선**을 지반종류에 따라 사용할 것을 제안하고 있음
- 최근 연구결과, 제시된 하중전이곡선을 이용하여 설계할 경우, 기초 구조물의 대구경화로 인해 실제 구조물의 거동 특성에 비하여 보수적인 설계가 될 수 있으므로 이를 보완할 새로운 설계기준에 대한 연구가 진행중 임



해상풍력 기초 거동 개념 (Randolph and Gourvenec, 2011)



# 모노파일 기초(Monopile)





## 모노파일 기초(Monopile)

### ① 연직 거동(Axial performance)

- 모노파일 두부에서의 연직변위는 말뚝자체의 압축변형량과 말뚝 선단의 침하량의 합으로 이루어짐

• 연직방향 주면 하중전이 함수식,  $t$ - $z$  곡선 (API, ISO)

- 임의의 심도에서 말뚝의 연직변위량과 주면지지력 관계

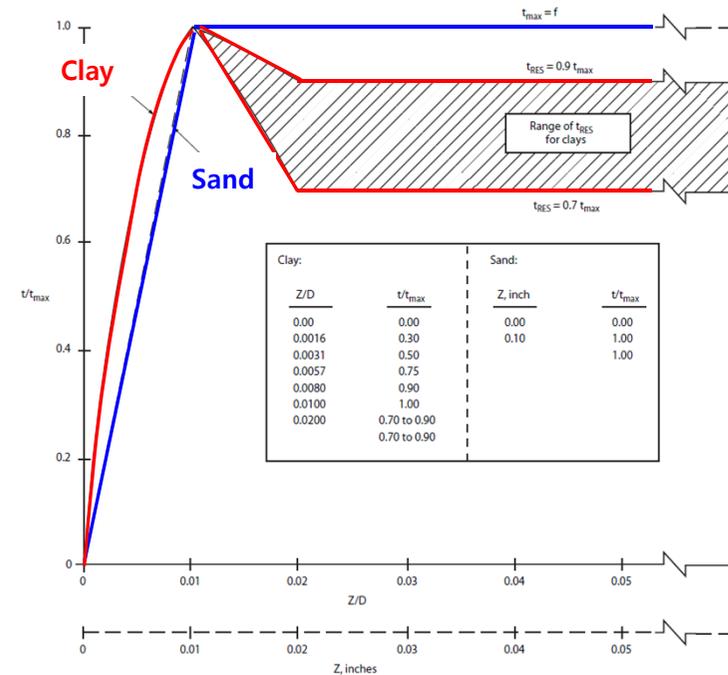
- 점성토는 극한지지력 이후 잔류강도( $t_{res}$ )를 감소시킴

지반종류	$z/D$	$t/t_{max}$
Clay	0.0016	0.30
	0.0031	0.50
	0.0057	0.75
	0.0080	0.90
	0.0100	1.00
	0.0200	0.70~0.90
	$\infty$	0.70~0.90

$z$ =임의 심도에서의 말뚝 변위량(mm)  
 $t$ =발현된 단위 주면지지력(kPa)

지반종류	$z$ (in.)	$t/t_{max}$
Sand	0.000	0.00
	0.100	1.00
	$\infty$	1.00

$D$ =말뚝의 직경(in, mm)  
 $t_{max}$ =극한 단위 주면지지력(kPa)



연직방향 하중전이곡선 (API, ISO)

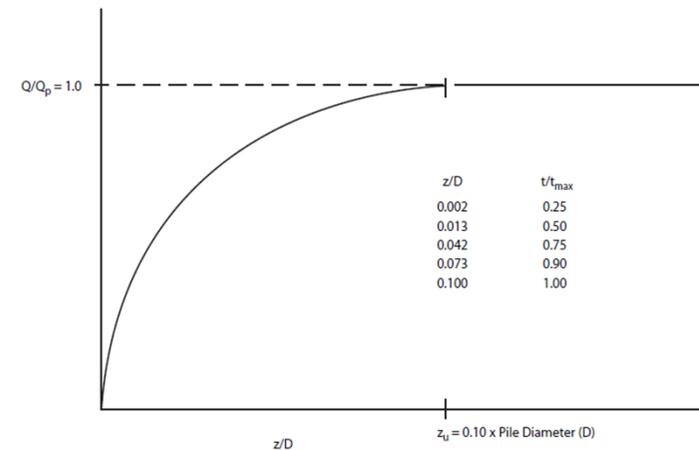


## 모노파일 기초(Monopile)

- 말뚝 선단 하중전이 함수식,  $q$ - $z$  곡선 (API, ISO)
  - 연직변위량과 선단지지력과의 관계
  - 말뚝의 선단지지력이 최대로 발현되기 위해서는 말뚝 선단의 침하량이 말뚝 직경의 약 10% 이상 발생해야 한다는 실험적 결과에 따라 제안됨

지반종류	$z/D$	$Q/Q_p$
Clays/ Sands	0.002	0.25
	0.013	0.50
	0.042	0.75
	0.073	0.90
	0.100	1.00

$z$ =말뚝 선단 변위량 (mm)  
 $D$ =말뚝의 직경(mm)  
 $Q$ =발현된 선단지지력(kN)  
 $Q_p$ =극한선단지지력(kN)



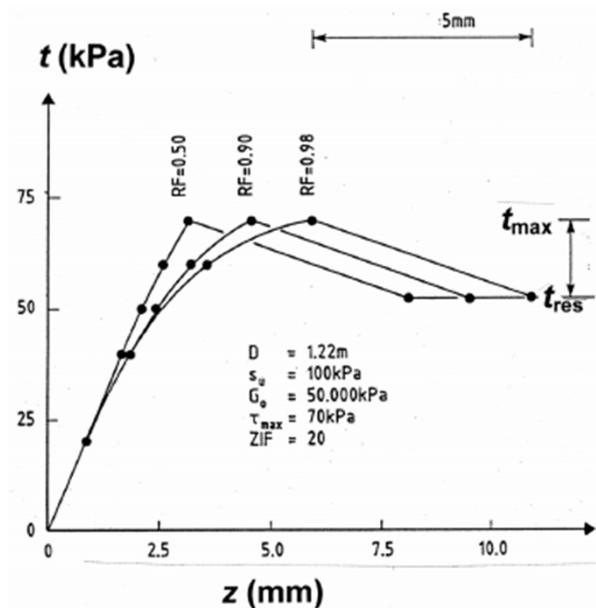
말뚝의 선단 하중전이곡선 (API, ISO)



# 모노파일 기초(Monopile)

- 연직방향 주면 하중전이 함수식, t-z 곡선 (DNV)

$$z = t \frac{R}{G_0} \ln \frac{z_{IF} - r_f \frac{t}{t_{\max}}}{1 - r_f \frac{t}{t_{\max}}} \text{ for } 0 \leq t \leq t_{\max}$$



t-z 곡선의 예

여기서,

R: 파일의 반지름

G<sub>0</sub>: 초기 전단탄성계수

z<sub>IF</sub>: 무차원 계수 (=영향원 반지름/파일 반지름)

r<sub>f</sub>: curve fitting parameter

- 점성토 지반 G<sub>0</sub>

$$G_0 = \frac{300}{I_p} \cdot s_u$$

$$G_0 = 600 \cdot s_u - 170 \cdot s_u \sqrt{OCR - 1}$$

- 사질토 지반 G<sub>0</sub>

$$G_0 = \frac{m \sqrt{\sigma_a \sigma_v}}{2(1+\nu)} \text{ with } m = 1000 \tan \phi$$

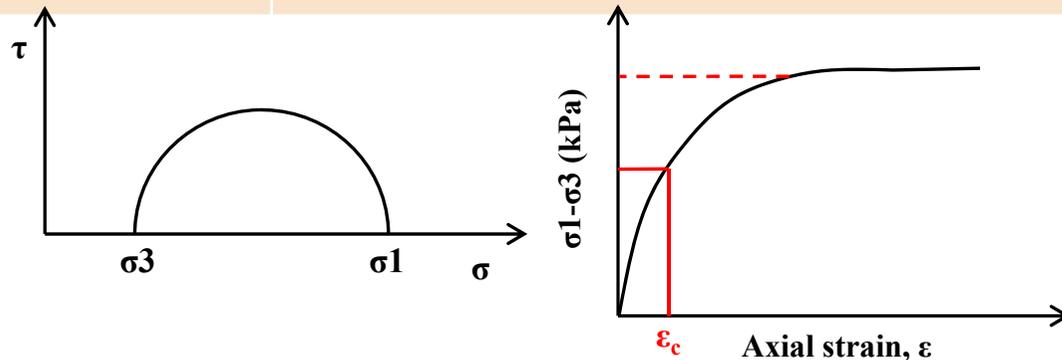


## 모노파일 기초(Monopile)

### ② 수평 거동(Lateral performance)

- 말뚝의 수평방향 하중전이함수식인 p-y 곡선은 임의의 심도에서의 말뚝의 수평지지력과 수평변위량의 관계를 나타낸 식
- 동적하중 조건하에서는 정적하중 조건에서의 하중전이 함수식보다 감소된 값을 적용하도록 제시함
- 연약한 점성토 지반, p-y곡선 (API, ISO)
  - ✓ 정적 수평하중에 대한 p-y 함수식

지반종류	$p/p_u$	$y/y_c$	비고
Soft clay	0.00	0.0	p=발현된 단위수평지지력(kPa) y=말뚝의 수평 변위량(m) $y_c = 2.5 \cdot \epsilon_c \cdot D$ (m) $\epsilon_c$ = 비배수 압축시험 시 최대 축차응력의 1/2에 해당하는 변형률
	0.23	0.1	
	0.33	0.3	
	0.50	1.0	
	0.72	3.0	
	1.00	8.0	
	1.00	$\infty$	



### • 단단한 점성토 지반, p-y곡선 (API, ISO)

: 비선형의 거동을 보이며, 연약한 점성토 지반보다는 brittle한 거동을 보임

동적 p-y 곡선 산정 시, 큰 변위에서 발생하는 급격한 강도저하의 예측이 중요함

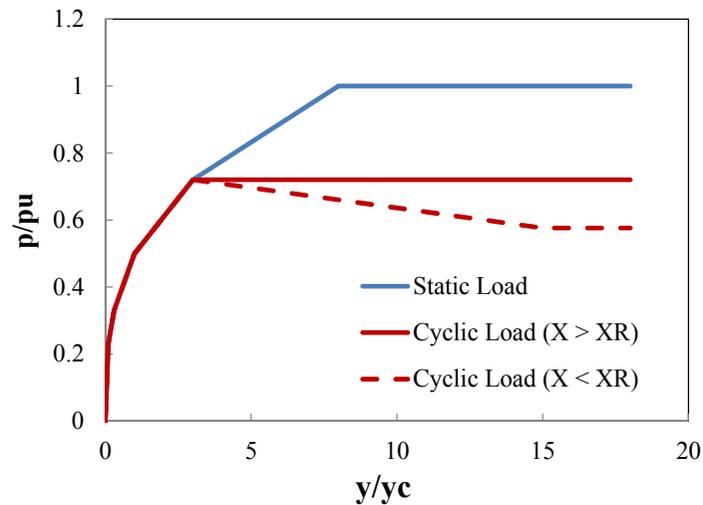


## 모노파일 기초(Monopile)

### ✓ 동적 수평하중에 대한 p-y 함수식

지반종류	$X > X_R$		$X < X_R$	
	$p/p_u$	$y/y_c$	$p/p_u$	$y/y_c$
Soft clay	0.00	0.0	0.00	0.0
	0.23	0.1	0.23	0.1
	0.33	0.3	0.33	0.3
	0.50	1.0	0.50	1.0
	0.72	3.0	0.72	3.0
	0.72	$\infty$	$0.72 X/X_R$	15.0
			$0.72 X/X_R$	$\infty$

### - 정적 수평하중 vs. 동적 수평하중 p-y 곡선 비교 (API, ISO)





## 모노파일 기초(Monopile)

- 점성토 지반, p-y곡선 (DNV)
- API, ISO 기준과 동일함, 식으로 제시
- 정적 수평하중에 대한 p-y 함수식

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/3} & \text{for } y \leq 8y_c \\ p_u & \text{for } y > 8y_c \end{cases}$$

$$X_R = \frac{6D}{\gamma D/c + J}$$

- 동적 수평하중에 대한 p-y 함수식

$X > X_R$	$X \leq X_R$
$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/3} & \text{for } y \leq 3y_c \\ 0.72p_u & \text{for } y > 3y_c \end{cases}$	$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/3} & \text{for } y \leq 3y_c \\ 0.72p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R}\right) \frac{y - 3y_c}{12y_c}\right) & \text{for } 3y_c < y \leq 15y_c \\ 0.72p_u \frac{X}{X_R} & \text{for } y > 15y_c \end{cases}$



## 모노파일 기초(Monopile)

- 사질토 지반에서의 p-y 함수식 (API, ISO, DNV)

$$P = A \times p_u \times \tanh \left[ \frac{k \times H}{A \times p_u} y \right]$$

$A = 0.9$  : 동적하중재하 시

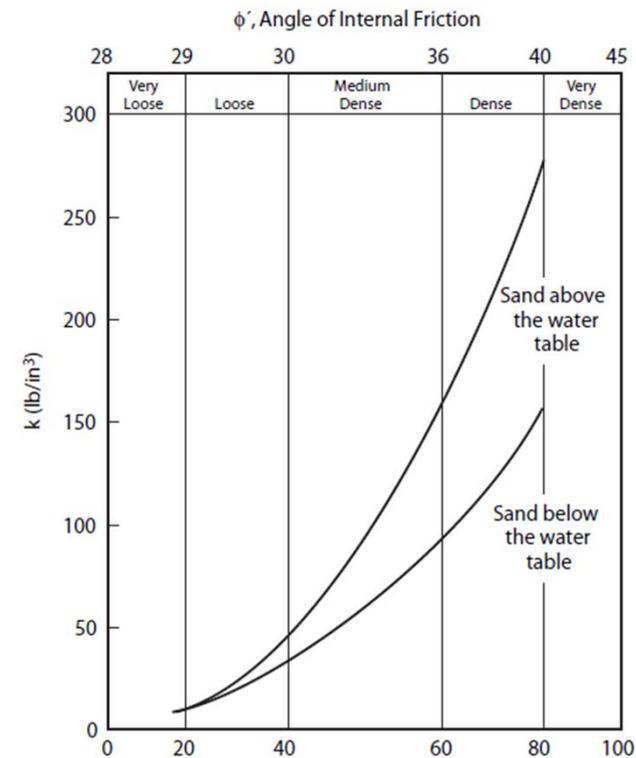
$A = \left( 3.0 - 0.8 \frac{H}{D} \right) \geq 0.9$  : 정적하중재하 시

여기서,

$p_u$  (kN/m): 임의의 심도 H(m)에서의 말뚝의 단위길이당  
극한수평지지력

y: 말뚝의 수평변위량(m)

k: 최대 지반반력계수



내부 마찰각과 k 값의 관계 도표  
(API, 2007)



## 모노파일 기초(Monopile)

- 수평 변위를 이용한 설계
- ULS (DNV)
  - 복합하중(수평 + 모멘트)에서는 지지력 + 변위로 안정성 평가해야 함
  - 앞서 제시된 p-y 곡선 사용
- SLS (DNV)

- 점성토 곡선은 초기 기울기가 무한대임
- 아래와 같이 수정해야 함

$$k = \xi \cdot \frac{P_u}{D \cdot (\varepsilon_c)^{0.25}}$$

여기서,  
 $\xi = 10$  (normally consolidated)  
 $\xi = 30$  (over-consolidated)

- 사질토 곡선 사용 가능
- 단, 초기 기울기를 정확하게 모사하기 위해서 데이터 간격을 촘촘하게 적용해야 함



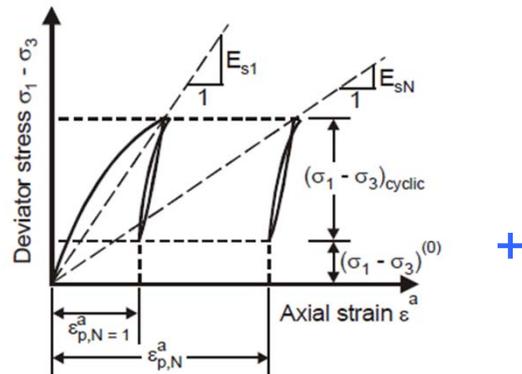
## 모노파일 기초(Monopile)

- 반복하중을 고려한 해석 방법

- 반복하중에 의해 지반의 강성이 감소하는 효과를 해석에 반영할 수 있도록 제안된 방법

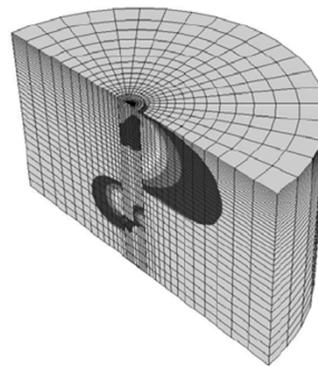
- Stiffness Degradation Method (Achmus et al., 2007)

- 실내실험(cyclic triaxial test)을 이용하여 산정된 **반복하중 작용 시 감소되는 지반의 강성을 수치해석에 반영하여** 반복하중 작용 시 파일의 거동을 분석하는 방법

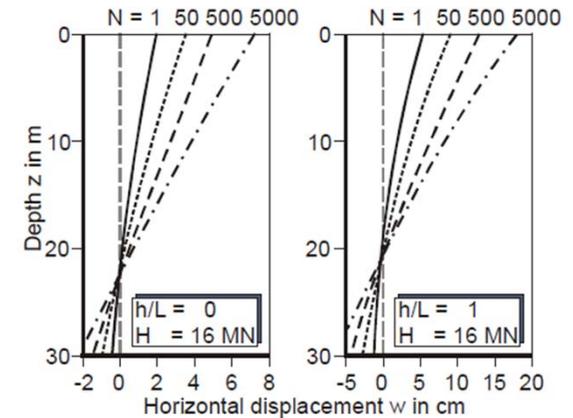


반복하중 작용 시 지반강도 감소  
(실내실험)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000



하중작용 시 영향 범위  
(수치해석)



- Strain Wedge Model (Lesny and Hinz, 2009)

- 반복횟수에 따른 지반의 거동 특성을 반복삼축시험 (cyclic triaxial test) 을 통해 산정
- 기존의 SWM(Strain Wedge Model)의 **입력변수  $\epsilon_{50}$ 에 반복하중의 영향이 고려되도록** 입력하여 해석하는 방법

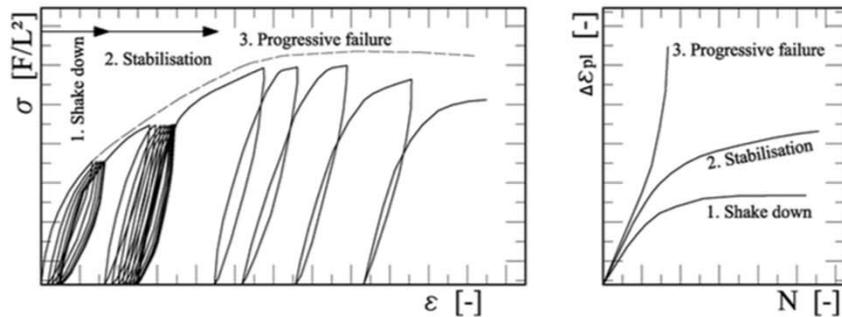


## 모노파일 기초(Monopile)

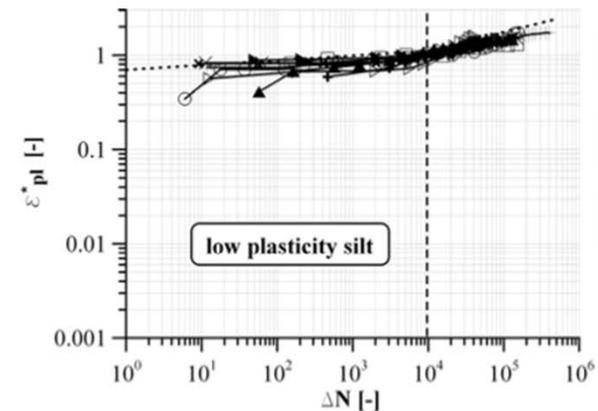
- 반복하중을 고려한 해석 방법

- Strain Wedge Model (Lesny and Hinz, 2009)

- 반복횟수에 따른 지반의 거동 특성을 반복삼축시험 (cyclic triaxial test) 을 통해 산정



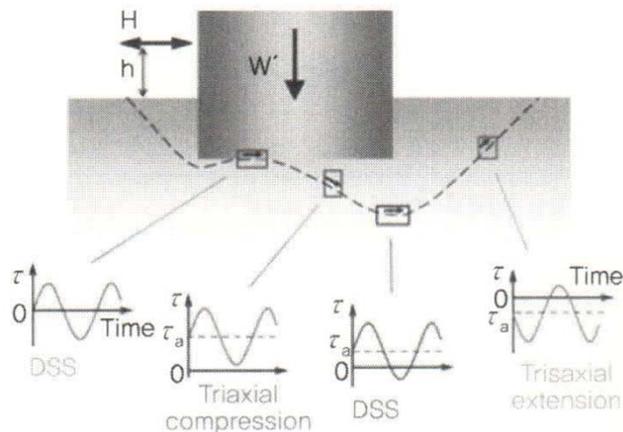
$$\epsilon_{pl}^N = \begin{cases} \epsilon_{pl}^1 \cdot N^\alpha & N \leq 10^4 \\ \epsilon_{pl}^1 \cdot 10^{4(\alpha-\alpha')} \cdot N^{\alpha'} & N > 10^4 \end{cases}$$



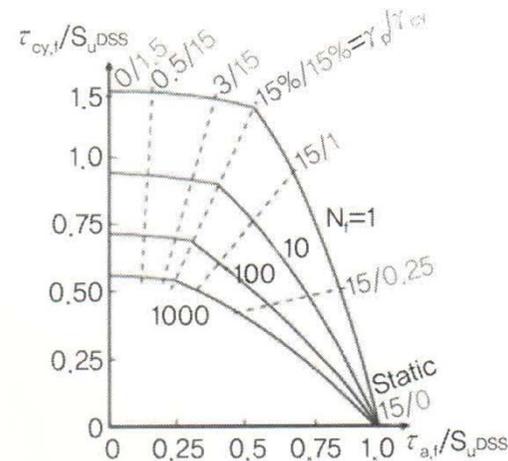


## 모노파일 기초(Monopile)

- UDCAM(Undrained Cyclic Accumulated Model, NGI, 2007)
  - NGI(Norwegian Geotechnical Institute)에서 개발
  - UDCAM 모델을 이용한 해석법은 반복하중에 의한 지반의 **응력상태(인장, 압축, 전단), 반복하중의 크기, 횡수, 반복하중에 의한 지반 강도감소 특성**을 고려하여 기초 구조물의 거동 특성을 분석하는 방법
  - 기존의 유사정적하중(quasi-static load)이 아닌 반복횟수, 크기 등을 고려한 하중을 산정한 후 수치해석 수행
  - 실제 현장조건과 유사하게 지반, 하중, 구조물 조건을 모사하여 해석을 수행함



반복하중 작용 시 지반 내 응력상태  
(Andersen, 2007)

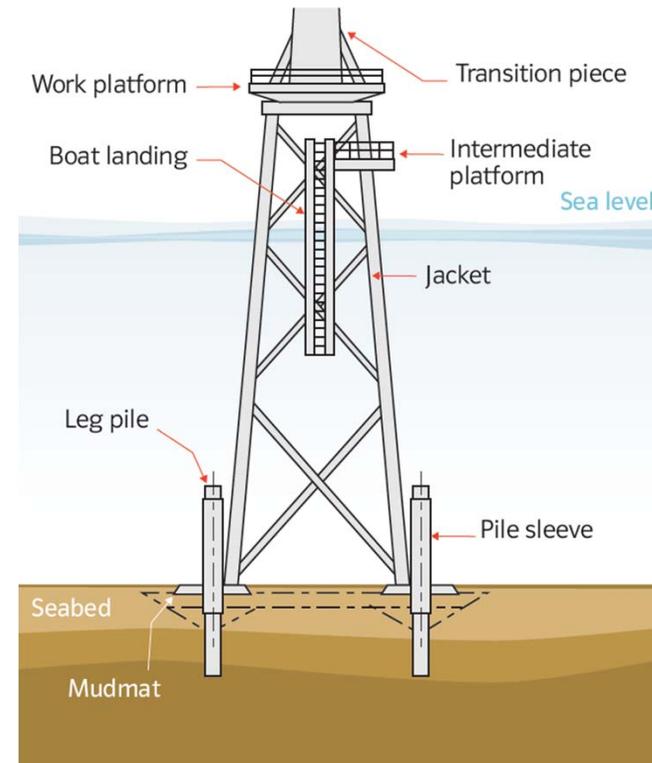


반복하중에 따른 지반강도 감소 곡선  
(Andersen, 2007)



## 재킷 기초(Jacket)

- 재킷 기초 설계시 고려사항
  - 재킷의 크기 및 브레이스(brace)의 종류
  - 레그(leg)의 직경 및 두께
  - 레그의 간격
  - 트랜지션피스(transition piece)
  - 재킷과 기초파일의 연결부
  - 레그와 브레이스의 연결부(joint)





## 재킷 기초(Jacket)

### ● 재킷 기초 개요

- **재킷형 지지구조물**이란 상단 또는 재킷 자체에 의해 발생한 하중을 4개 또는 3개의 레그파일(leg pile)을 통하여 지반에 전달시키는 구조물을 말함
- 파일은 레그 속에 관입되거나 슬리브(sleeve) 등의 연결부를 통하여 구조물과 일체화 됨
- 레그파일들은 브레이스(brace)에 의하여 결속되어 하중을 분배함
- 레그파일과 브레이스 부재는 주로 원형관이 사용되며, 레그와 브레이스의 연결부를 joint라고 함
  
- 재킷 구조물의 장점 (출처: [www.owectower.no](http://www.owectower.no))
  - 고정식이라는 특성 때문에 해상상태의 악화에 따른 영향을 덜 받음
  - 파랑운동을 마주하는 면적이 모노파일에 비하여 작아 모노파일에 비하여 파랑하중이 작음
  - 기존 해양 석유 및 가스 시추산업의 공급망(supply chain)이 많아 제작사와 전문가가 많음
  
- 재킷 구조물의 단점
  - 초기 건설비용이 높고, 잠재적으로 유지관리 비용이 높음
  - 운반이 다소 까다롭고 고가임



## 재킷 기초(Jacket)

### ● 재킷 기초의 계획 및 설계

#### ① 재킷의 형태

- 발전기 및 타워에서 작용하는 하중에 의한 연직력 및 모멘트는 주로 **기초파일의 축력**을 통하여 지반으로 전달됨  
→ **레그(leg)의 직경과 두께 및 하단에서의 레그 간격**이 설계의 상당부분 결정
- 모멘트에 대한 저항 → 레그 간격이 클수록 저항력이 증가함
- 레그의 일반적인 기울기 : 1/7~1/10
  - 레그의 기울기가 급해질수록 → 연직반력 증가, 전단력 감소
  - 레그의 기울기가 완만해지면 → 연직반력 감소, 전단력 증가
- 브레이스(brace) : 각각의 레그를 연결하여 수평력을 지반에 전달하고 비틀림에 대하여 저항하도록 함

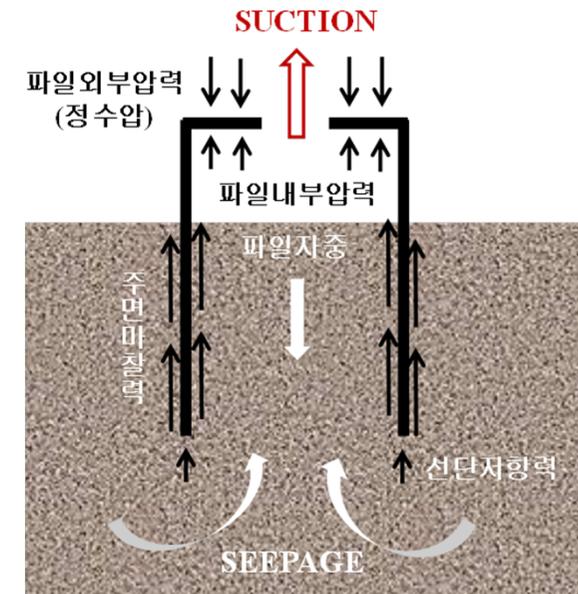
단일경사 브레이스	X 브레이스	K 브레이스
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 단순하고 용접량이 작아 경제적</li> <li>▪ 파괴 시 전체 구조가 위험할 수 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 파괴 시 전체 구조의 붕괴가 적음</li> <li>▪ 허용응력이 큼</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 구조적 여유력 및 경제성이 단일경사 브레이스와 X 브레이스의 중간특성</li> </ul>



## 석션 기초(Suction pile)

### ● 석션 기초의 원리

- **석션 기초(suction pile)**는 보통 상부는 밀폐되고 하부가 열린 얇은 컵의 모양을 하고 있기 때문에 석션케이슨(suction caisson) 또는 석션버킷(suction bucket) 기초로도 불리움
- 수중펌프를 이용하여 기초 내부의 물이나 공기와 같은 유체를 외부로 배출할 때 발생하는 **기초 내외부의 수압차를 이용**하여 지반에 관입됨
- 석션압에 의한 관입 외에 지반의 유효응력 변화와 석션에 의한 내부토사의 부착력 감소 등 복합적인 원리가 작용함
- 설치 시 내부 토사의 보일링 및 히빙 발생을 방지해야 함
- **관입력( $F_D$ ) = 파일자중 + 석션압 x 단면적**
- **관입저항력( $F_R$ ) = 주면마찰력 + 선단저항력**
- 석션 기초는 보통 길이와 직경비가 2:1을 넘지 않음
- 단일말뚝분만 아니라 트라이포드나 재킷 기초로도 활용 가능함



석션 기초의 설치 원리



## 석션 기초(Suction pile)

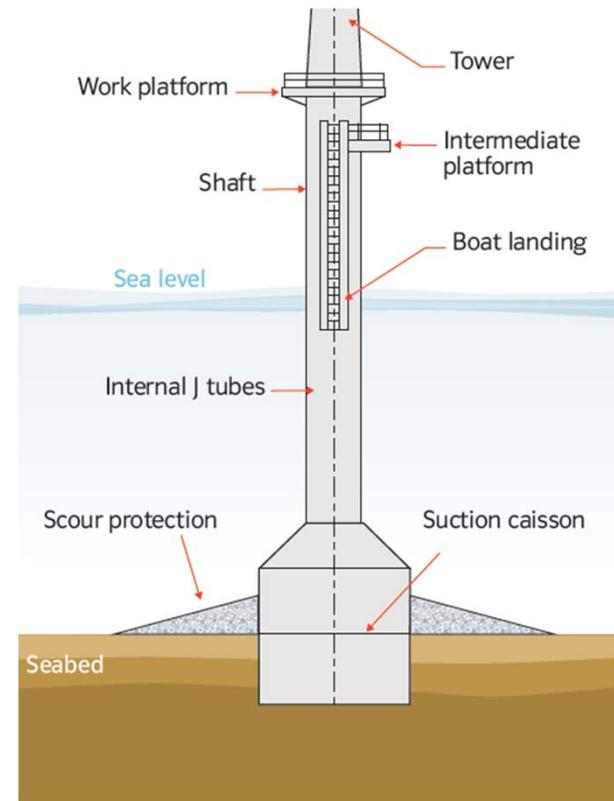
- **석션 기초 구조물의 특징**
- **대수심에서 적용성이 높음**
  - 진동이나 타격에 의한 방법은 설치수심이나 침설심도에 비례하여 공사비가 증가하므로 대수심에 적용하기 곤란한 반면, 석션 기초의 경우 수중펌프에 의해 간편하게 침설이 가능함
  - 수심이 클수록 정수압이 커져서 보다 큰 석션압을 발생시킬 수 있음
- **지반 속으로 관입이 간편함**
  - 작용하는 관입력은 석션압과 수압 면적의 곱이므로, 수압 면적이 클수록 큰 관입력을 얻을 수 있음
- **관입에 의해 안정성이 증대됨**
  - 지반 내에 침설된 측벽의 수동저항은 활동에 대한 저항력으로 작용함
- **상부구조물의 경량화 및 소형화가 가능함**
  - 측벽(skirt)이 있어 구조물의 활동에 대한 저항, 지지력 등이 커져 결과적으로 상부구조물의 경량화 및 소형화가 가능함
- **지반조건에 따라 지반개량을 할 필요가 없는 경우가 있음**
  - 연약지반이 존재하더라도 관입 후 지지력을 얻을 수 있는 심도까지 관입하면 지반개량이 필요 없음
  - 표층이 연약지반이고 하층이 사질토로 된 토층구성인 경우 특히 유리함



## 석션 기초(Suction pile)

- 석션 기초 설계시 고려사항

- 지반조사
- 하중조건 검토
- 설계조건 검토
- 작용 하중조합별 안정성 평가
- 설계 석션압 검토
- 히빙(Heaving)량 검토
- 관입 시 부등침하
- 석션펌프 선정





## 석션 기초(Suction pile)

- 석션 기초의 안정성 평가

- 상부 구조물의 작용하중에 따라 연직 지지력과 횡방향 지지력 또는 인발 지지력의 산정이 필요함
- 산정된 지지력을 바탕으로 연직하중과 모멘트의 동시 작용에 따른 지지력, 미끄러짐이나 회전에 대한 안정성 평가가 필요함
- 석션 기초 지지력의 평가방법은 많은 연구자들에 의해 제안되어 사용되고 있으나 **아직까지 공통적으로 활용되는 방법은 없음**
  - 미국에서 주로 사용하는 MOB(Mobile Offshore Base) 연구에서 도출된 방법
  - 호주의 UWA 대학(The University of Western Australia)에서 제안하는 방법
  - 유럽에서 주로 사용하는 NGI 방법
  - 일본의 석션 기초구조물 기술매뉴얼
- 대부분 **얕은기초의 지지력 공식과 한계평형법**에 기초를 둔 흠쇄기 방법을 근간으로 함
- 최근에는 복잡한 석션기초의 파괴메커니즘을 구현할 수 있는 **3차원 유한요소해석**을 이용하는 방법이 많이 활용되고 있음

⇒ **석션 기초의 지지력 산정방법을 정립하기 위한 추가적인 연구가 필요함**



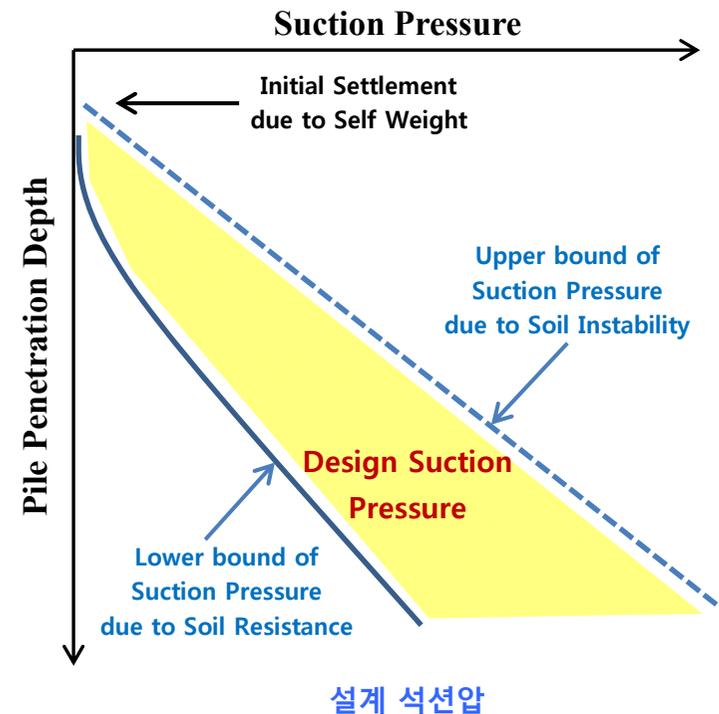
## 석션 기초(Suction pile)

- 석션기초의 설계 석션압 검토

- **최소석션압** : 석션기초가 지반의 저항력을 극복하고 관입하는 데 필요한 최소한의 석션압
- **최대석션압** : 내외부 압력차가 너무 커지게 되어 사질토 지반에서는 침투압에 의한 보일링(boiling)이 발생하거나 점성토 지반에서는 파일 내부의 점토가 절단되어 밀려 올라오는 플러깅(plugging)이 발생하는 석션압

- **설계석션압**은 최소와 최대석션압 사이값이 되어야함

- 설치도중 관입 깊이에 따라 석션압의 제어가 필요함





# 석션 기초(Suction pile)

## ① 사질토 지반 설계 석션압 산정식 (Houlsby and Byrne, 2004)

### • 사질토 지반 최소석션압

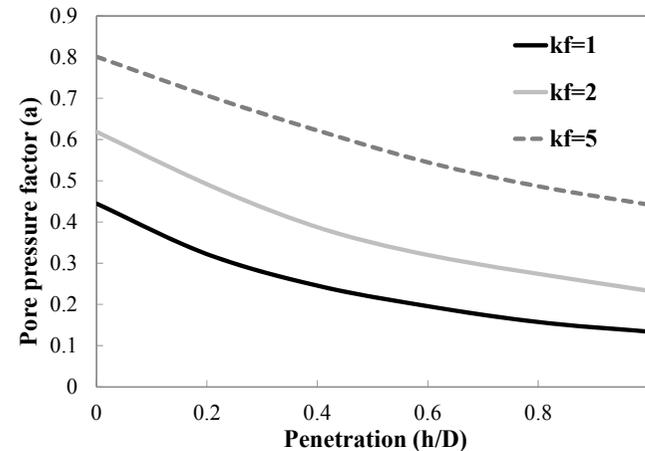
$$\underbrace{V' + s(\pi D_i^2 / 4)}_{\text{석션기초 관입력}} = \left( \gamma' + \frac{as}{h} \right) Z_o^2 \left( \exp\left(\frac{h}{Z_o}\right) - 1 - \left(\frac{h}{Z_o}\right) \right) (K \tan \delta)_o (\pi D_o) \longrightarrow \text{외부 주면 마찰력} \\
 + \left( \gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i^2 \left( \exp\left(\frac{h}{Z_i}\right) - 1 - \left(\frac{h}{Z_i}\right) \right) (K \tan \delta)_i (\pi D_i) \longrightarrow \text{내부 주면 마찰력} \\
 + \left( \left( \gamma' - \frac{(1-a)s}{h} \right) Z_i \left( \exp\left(\frac{h}{Z_i}\right) - 1 \right) N_q + \gamma' t N_r \right) (\pi D t) \longrightarrow \text{선단 저항력}$$

**a : 간극수압 계수 (pore pressure factor)**

### • 사질토 지반 최대석션압

: 내부 지반의 유효응력이 0이 되는 상태의 석션압

$$s = \frac{\gamma' h}{(1-a)}$$



관입깊이에 따른 간극수압 계수(a) 변화



## 석션 기초(Suction pile)

### ② 점성토 지반 설계 석션압 산정식 (DNV-RP-E303, 2005)

#### • 점성토 지반 최소석션압

$$p_s = \frac{(A_{wall} \cdot \alpha \cdot s_{u,D}^{av} + (N_c \cdot s_{u,tip}^{av} + \gamma' \cdot z) A_{tip} - W')}{A_{in}}$$

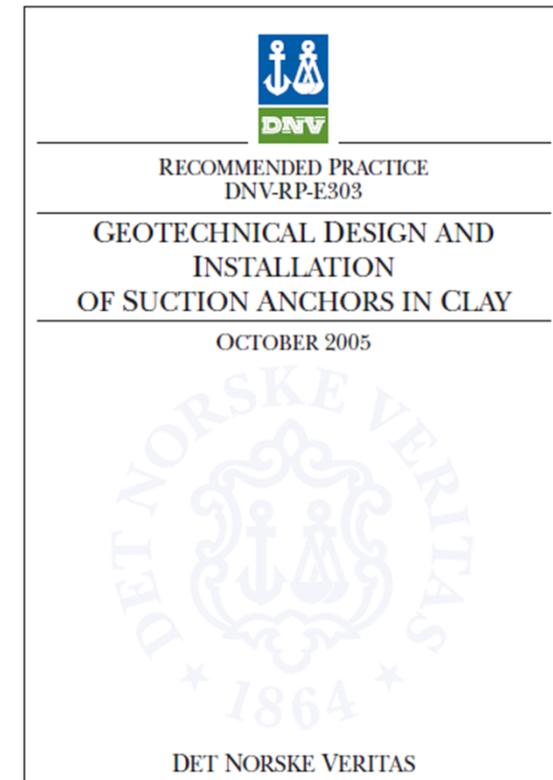
$\alpha$  = 부착력 계수, 1/점토 예민비( $S_t$ )

$N_c = 7.5$  (plane strain condition)

#### • 점성토 지반 최대석션압

$$p_a = N_c^* \cdot s_{u,tip}^{av} + \frac{A_{inside} \cdot \alpha \cdot s_{u,D}^{av}}{A_{in}}$$

$N_c^*$  = 관입 깊이에 따라 변화 (6.2~9)





# Outline

1. 해상풍력발전기 지지구조물 개요

2. 해상풍력 기초 설계기준 및 일반사항

3. 해상풍력 기초 종류별 설계 방법

**4. 수치해석 및 모형실험 연구**





## 정부 및 산업체 수행 과제

- **심해자원 생산용 해양플랜트 시장진출을 위한 해저장비 및 URF 설치용 3,000m급 심해설치 공사기술 개발**  
2012.07.01 ~ 2015.06.30  
산업통상자원부 미래산업선도기술개발사업
- **해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술 개발**  
2013.08.27 ~ 2018.02.26  
해양수산부 첨단항만건설기술개발사업
- **석션기초 관입, 회수 시 거동분석 및 지지력 평가를 위한 모형시험**  
2013.03.01 ~ 2014.02.28  
현대중공업(주) 산업체 위탁연구과제

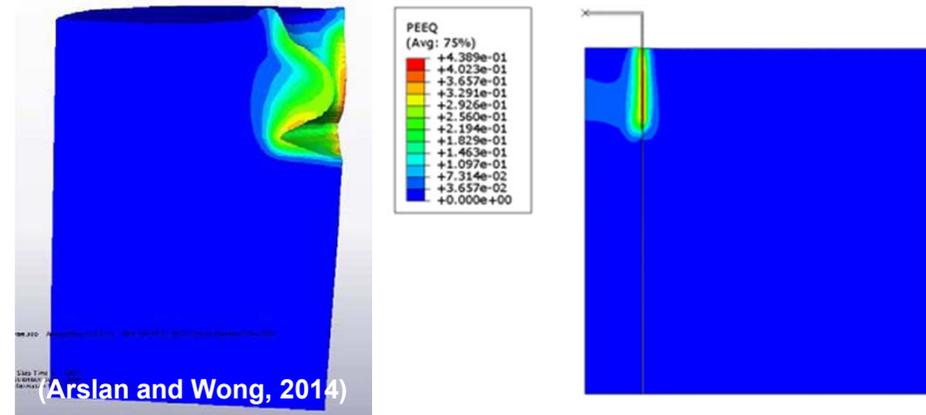


# 해상풍력 기초 수치해석

- 수치해석 프로그램

- **Abaqus**

- 유한요소해석(FEM)
- 구조 및 유체 등 범용 해석프로그램



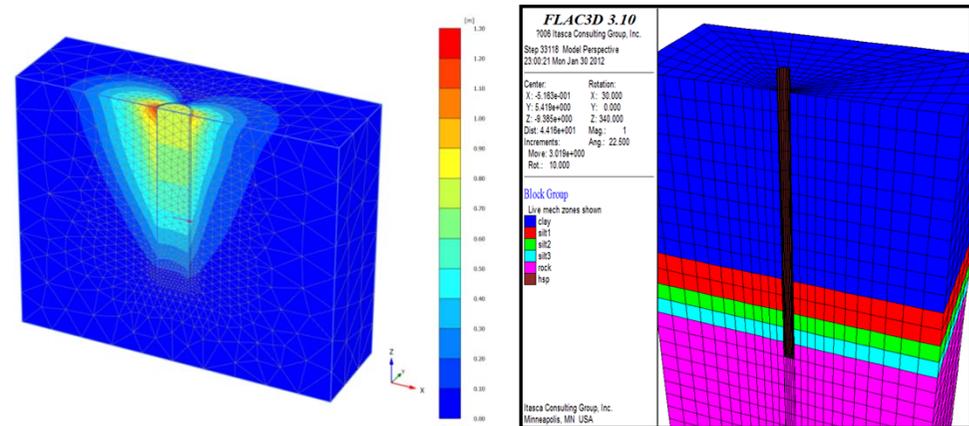
(Arslan and Wong, 2014)

- **PLAXIS**

- 유한요소해석(FEM)
- 지반공학 분야 해석 전용 프로그램

- **FLAC**

- 유한차분해석(FDM)
- 지반공학 분야 해석 전용 프로그램





## 해상풍력 기초 수치해석

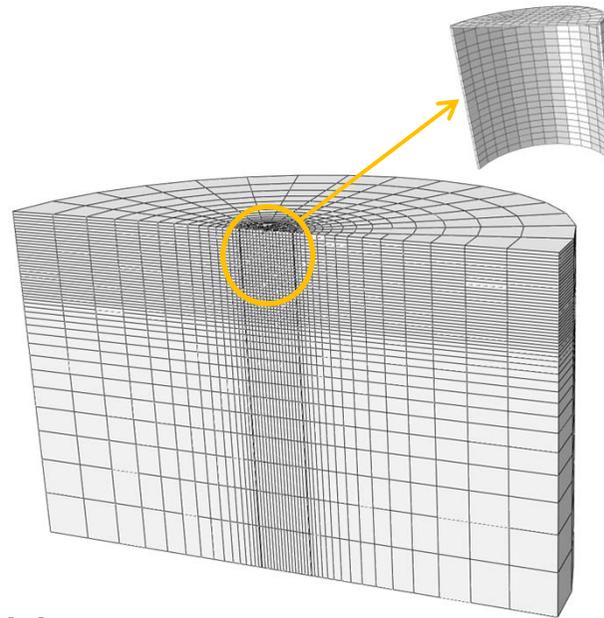
- 수치해석 모델 개요

- **Modeling & Mesh**

- Boundary condition
- Model size
- Mesh size
- Element type

- **Constitutive model**

- Mohr-Coulomb model
- Drucker-Prager model
- Tresca model
- Von Mises model
- Cam-Clay model



- **Input parameter**

- Density ( $\rho$ )
- Young's modulus ( $E$ )
- Poisson's ratio ( $\nu$ )
- Friction angle ( $\phi$ )
- Dilatancy angle ( $\psi$ )
- Cohesion ( $c$ )

- **Loading**

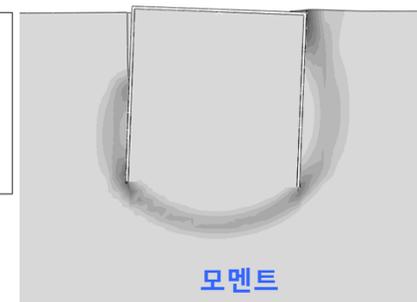
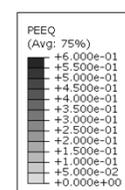
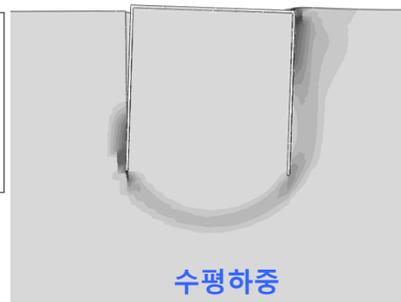
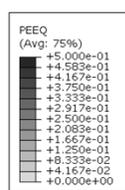
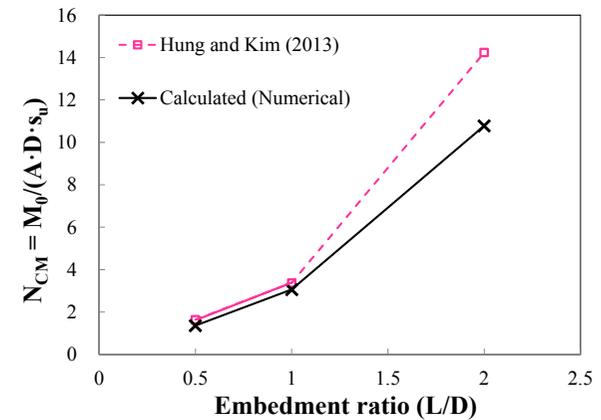
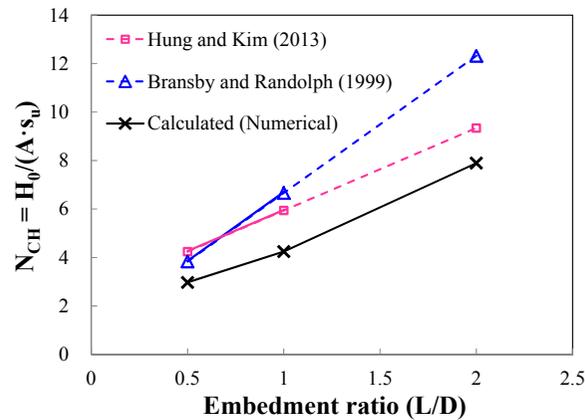
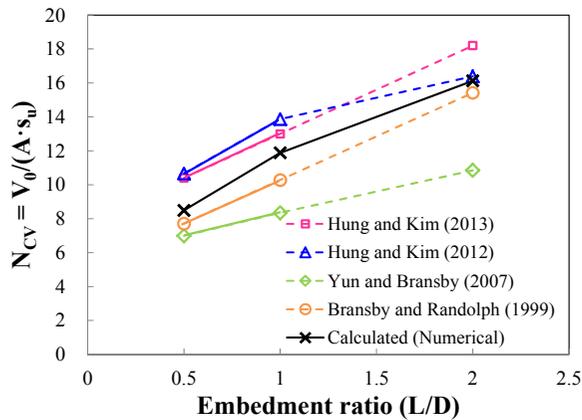
- Displacement control
- Load control
- Time step



# 해상풍력 기초 수치해석

## ● 석션 기초 수치해석 결과

- 점성토 지반에 설치된 석션기초의 지지력 평가 : 인터페이스의 영향 분석
- 기존 제안식 결과와 비교

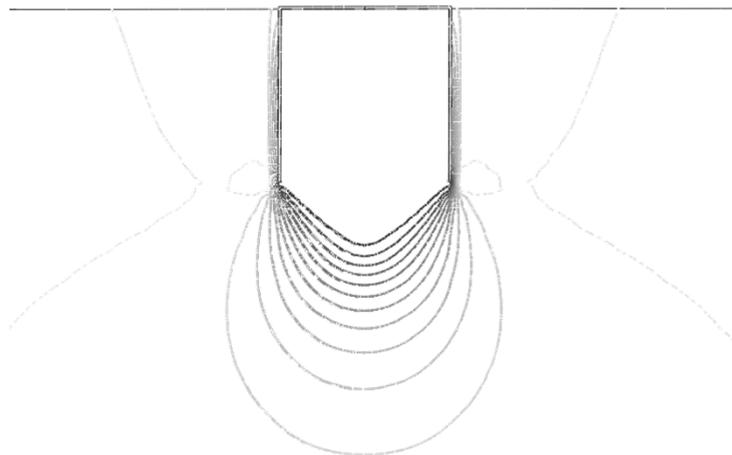
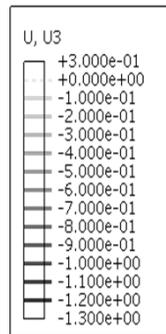


하중작용 시 소성변형도 (Equivalent plastic strain)

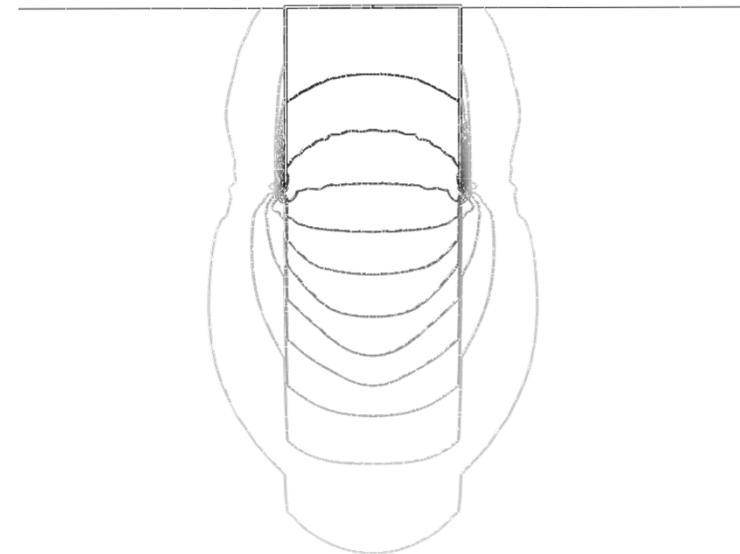


## 해상풍력 기초 수치해석

- **사질토 지반에 설치된 버킷기초의 수직지지력 해석**
  - 점성토 지반에서는 수직하중 작용 시 내부 지반이 일체거동 함
  - 사질토 지반에서는 내부지반에서 변위에 차이를 보임 → 내부거동 복잡, **Young's modulus에 따라 지지력 차이**



수직 변위 (Clay)

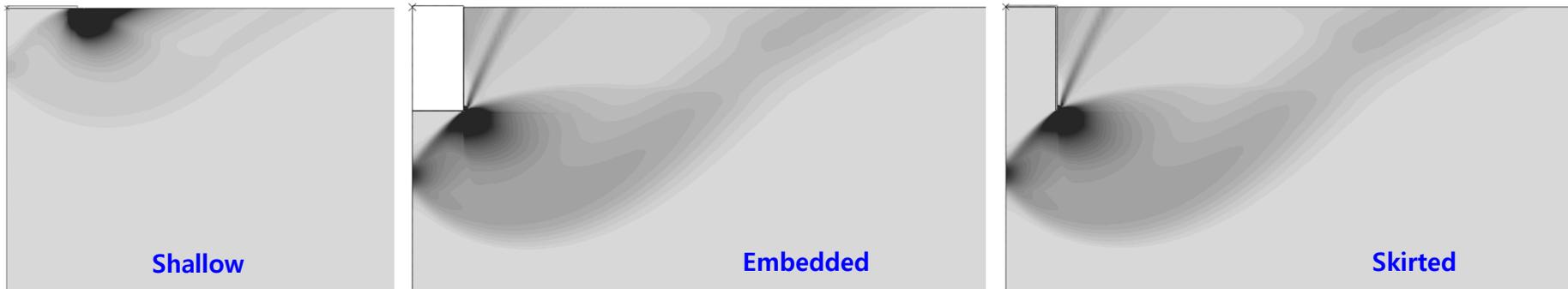
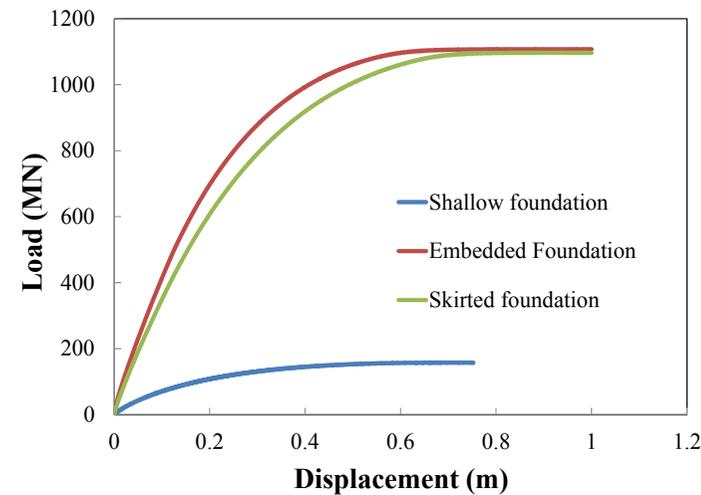


수직 변위 (Sand)



## 해상풍력 기초 수치해석

- 사질토 지반에 설치된 버킷기초의 수직지지력 비교
  - Skirt에 의한 지지력 향상 효과 분석
  - 극한상태 도달을 위하여 Young's modulus를 크게 증가시켜 해석 수행
  - **Shallow foundation**
  - **Embedded foundation**
  - **Skirted foundation**

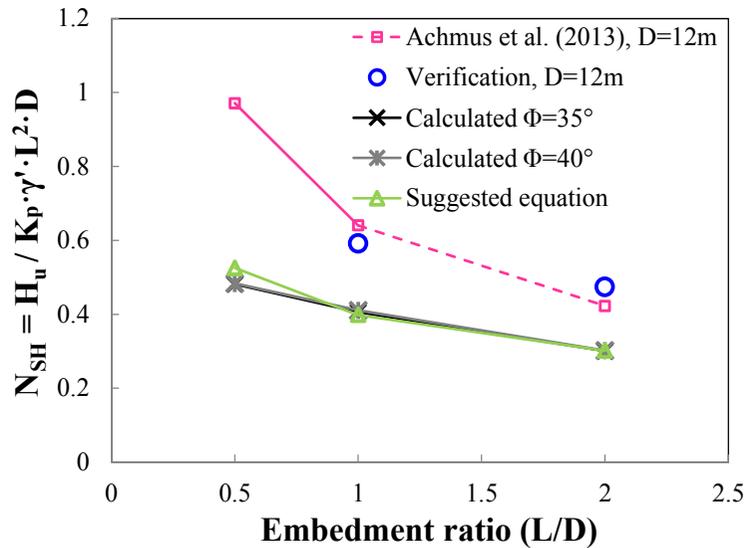


Maximum shear strain rate contour ( $\gamma'_{max}$ )



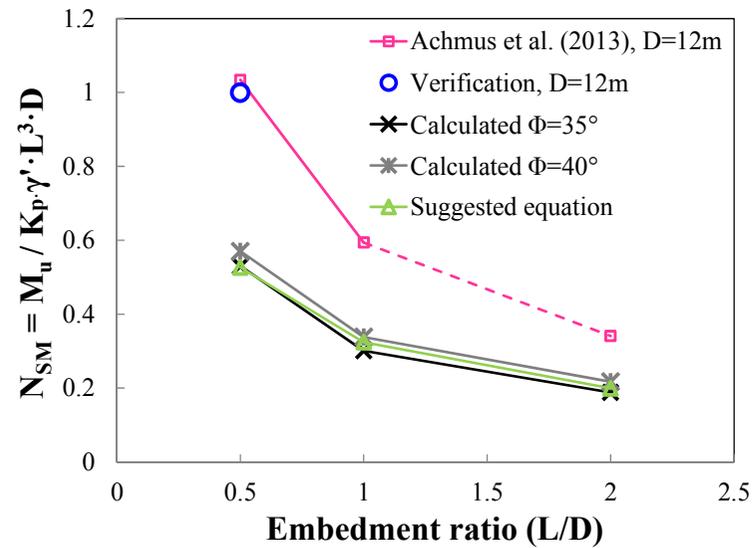
# 해상풍력 기초 수치해석

- **사질토 지반에** 설치된 석션기초의 수평 및 모멘트 지지력 해석
- 기존 연구(Achmus, 2013) 결과와 비교하여 모델 검증
- 수직하중이 작용하지 않는 상태에서의 **수평 및 모멘트 지지력 계산식 제안**



$$H_u = \frac{K_p \cdot \gamma' \cdot D \cdot L^2}{(L)^{0.4}}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

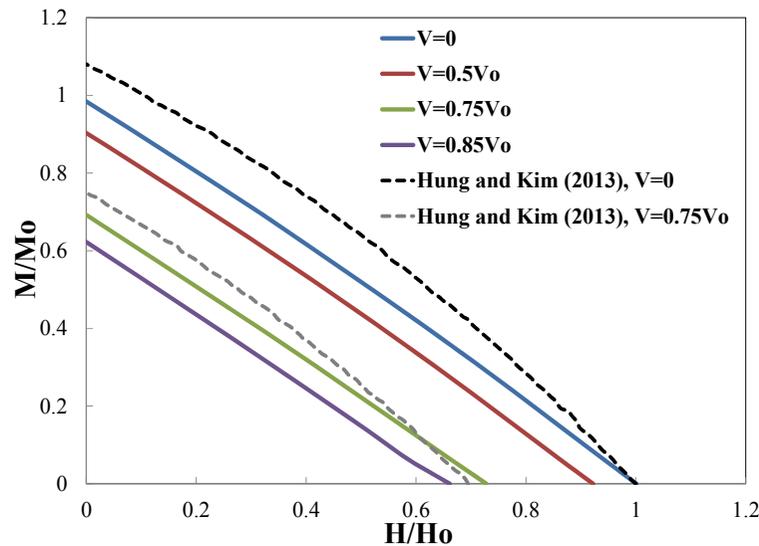


$$M_u = \frac{K_p \cdot \gamma' \cdot D \cdot L^3}{(0.5L)^{0.7}}$$

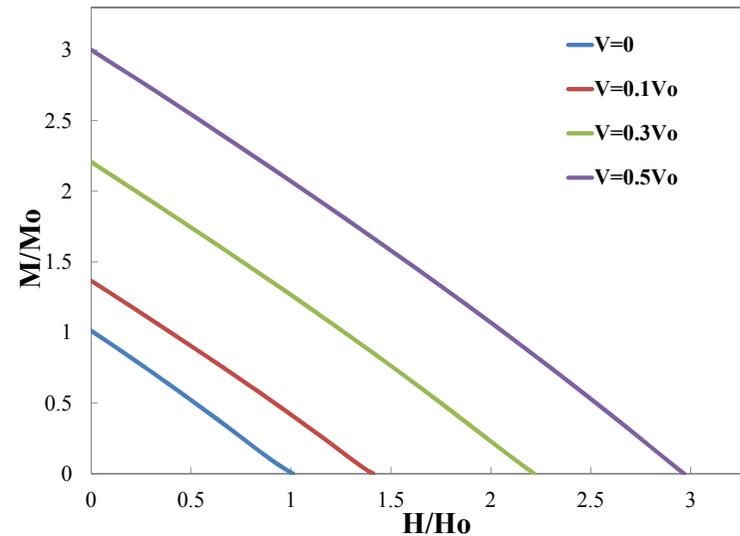


## 해상풍력 기초 수치해석

- 점성토 지반과 사질토 지반에 설치된 석션기초의 복합하중(combined load) 작용 시 극한지지력 산정을 위한 항복포락선(yield surface) 제시
- 점성토지반에서는 수직하중이 크게 작용할 수록 수평 및 모멘트 지지력이 감소하는 반면, 사질토 지반에서는 반대로 반대로 지지력이 증가함



점성토 지반 항복포락선

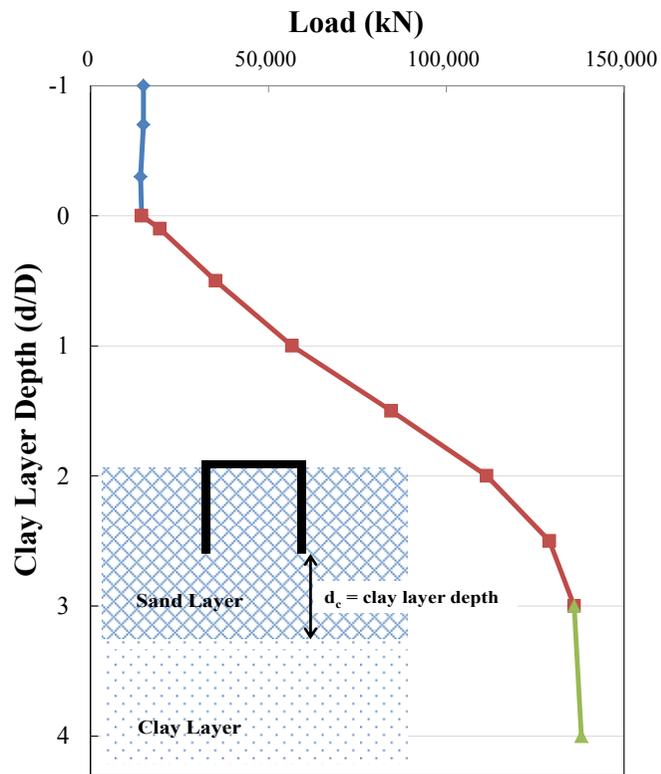


사질토 지반 항복포락선

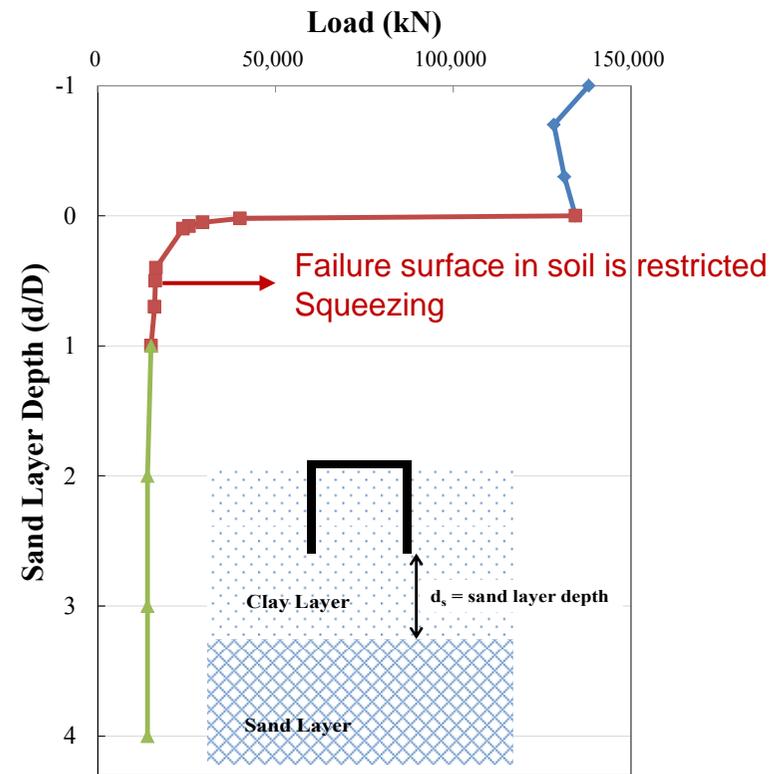


# 해상풍력 기초 수치해석

- 복합지반에 설치된 석션기초의 수직지지력 산정
- Sand over clay, Clay over sand 지반
- 하부층 위치 깊이에 따라 지지력이 변화함



Sand over clay 지반

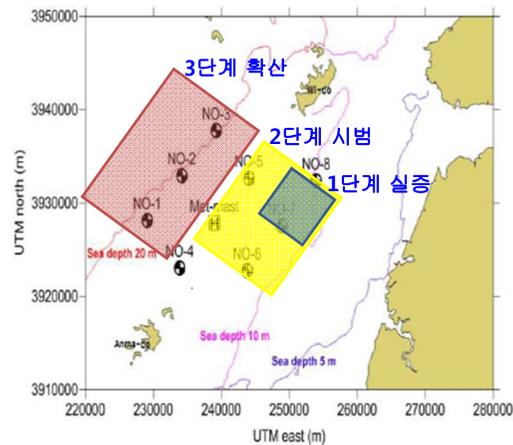


Clay over sand 지반

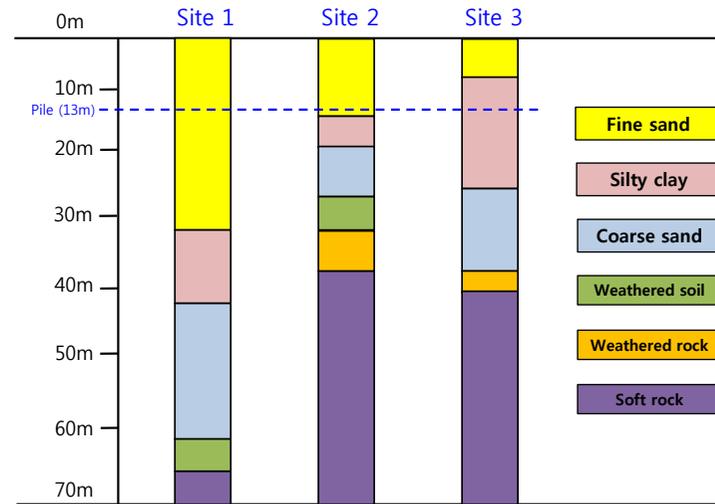


# 해상풍력 기초 수치해석

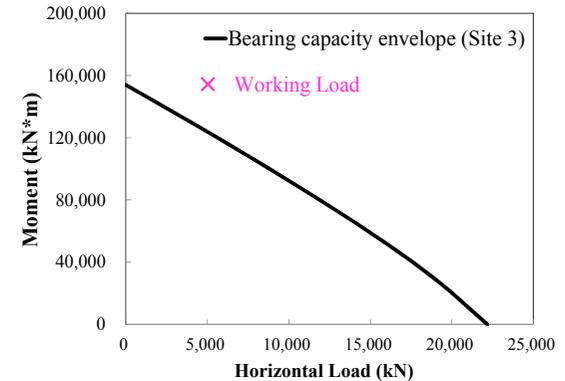
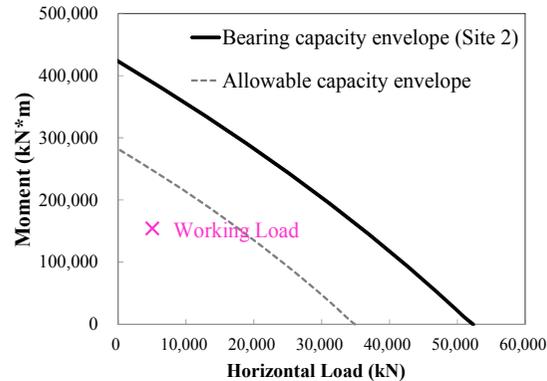
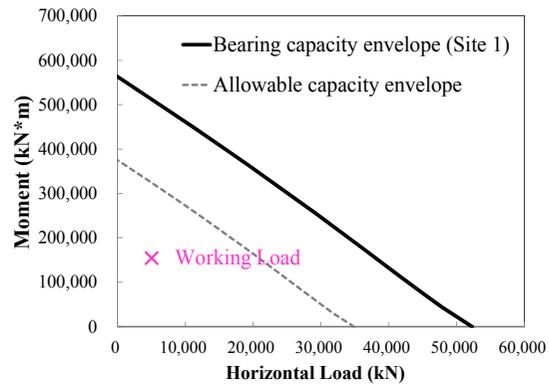
- 서남해 대표지반 주상도를 이용한 석션기초의 지지력 안정성 평가



대상지역



대표지반 주상도

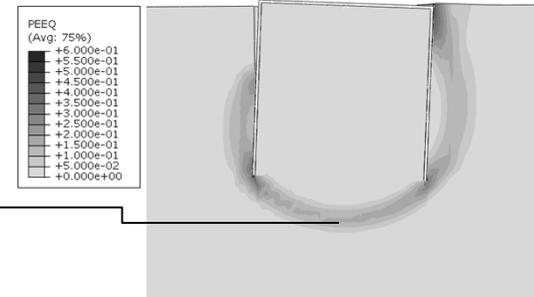


작용하중에 대한 안정성 평가



## 해상풍력 기초 수치해석

- 향후 연구 과제
  - Effect of cyclic loading
    - 변형률 / 응력경로 → Mode of shear
    - Hybrid Cyclic simple shear test





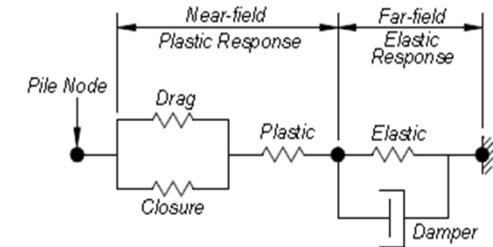
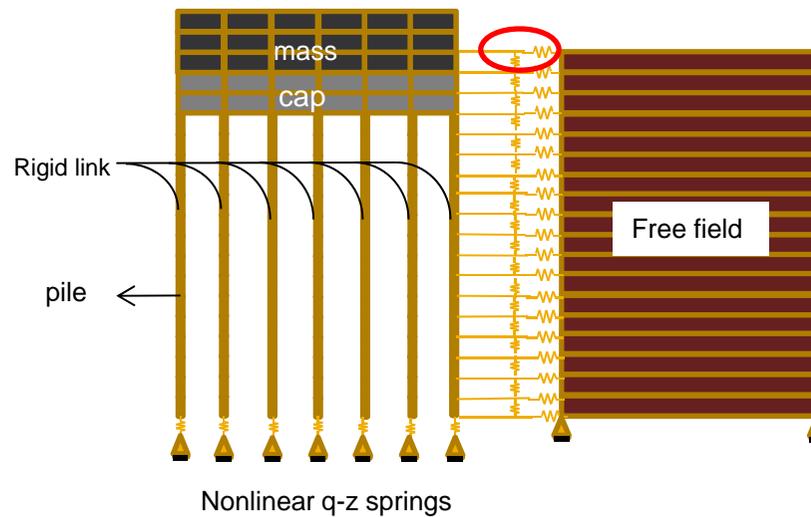
## 해상풍력 기초 수치해석

- 관입해석
  
- **Effective stress analysis**
  - 간극수압발생 특성 규명 → Function of shear strain amplitude / 체적임계변형률
  - 과잉간극수압모델



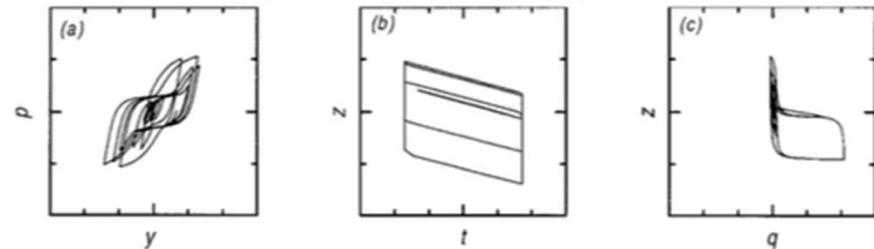
# 해상풍력 기초 수치해석

- 향후 연구 과제
  - Dynamic analysis
    - 연속체 해석
    - p-y 해석



## OpenSees

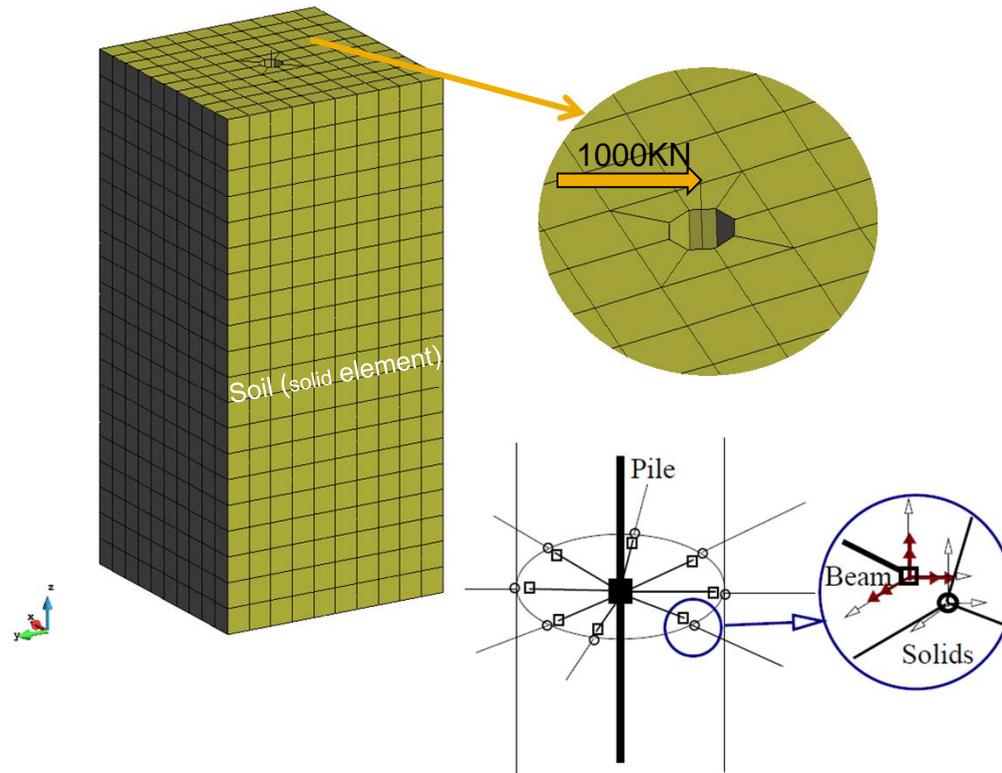
Open Source code for earthquake engineering simulations  
Boulangier et al. (1999)





## 해상풍력 기초 수치해석

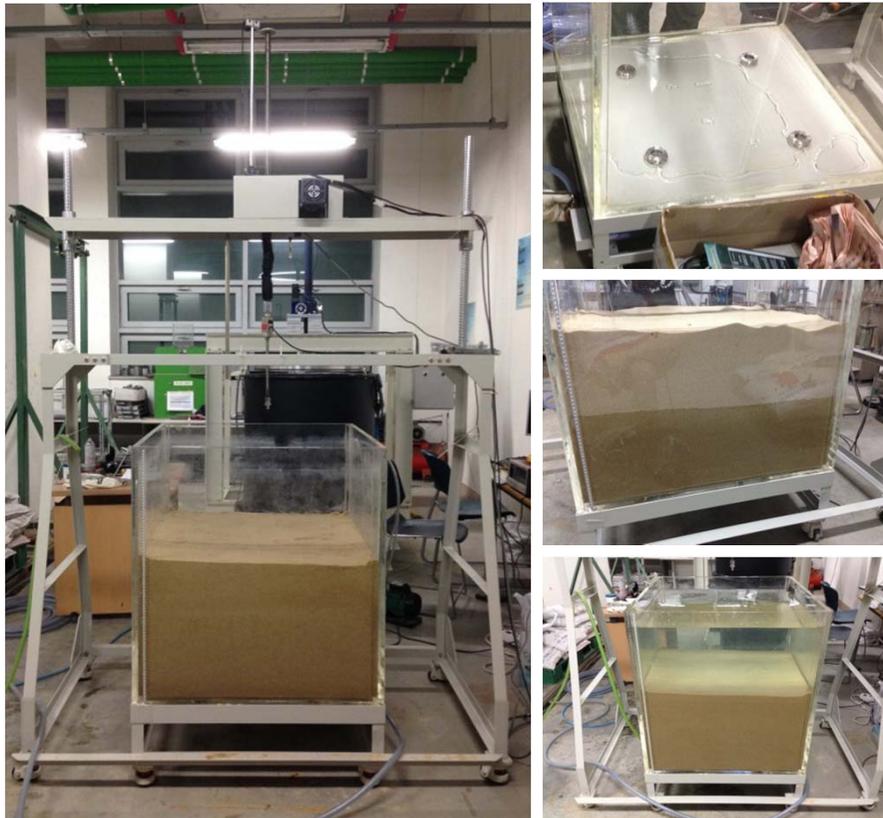
- 향후 연구 과제
  - Dynamic analysis
    - 연속체 해석
    - p-y 해석



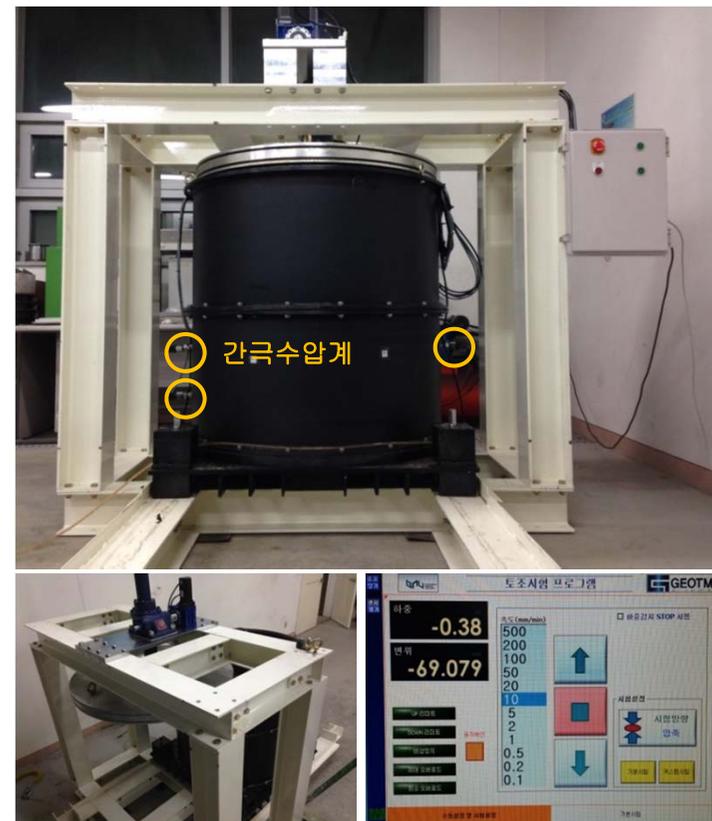


# 해상풍력 기초 모형실험

- 모형실험 토조 및 프레임



사질토 지반 실험 토조 및 프레임



점성토 지반 실험 토조 및 컨트롤 시스템



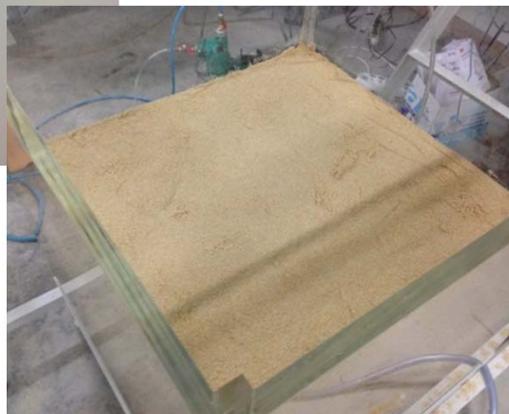
## 해상풍력 기초 모형실험

### ● 사질토 지반 조성 및 물성측정

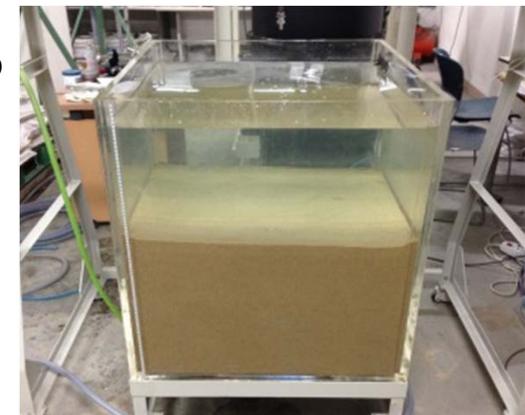
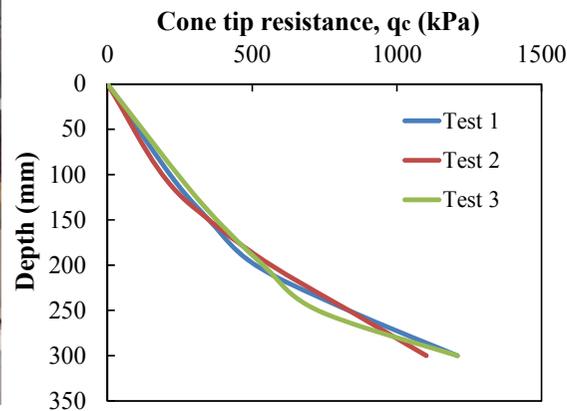
- 보통 조밀한 지반 : 전체 지반을 교란시킨 후, 자중침하를 통하여 지반 조성
- 조밀한 지반 : 총 5 개의 층다짐을 수행하여 조밀한 지반 조성
- 지반의 상대밀도는 PCPT로 측정된 cone tip resistance ( $q_c$ )을 통하여 예측하였음
- **Portable cone penetrometer (PCPT)**
- **Relative density : 50% (medium-dense) / 75% (dense)**
- 지반은 포화된 상태로 실험 수행



PCPT



Compacted dense sand



Saturated test soil



## 해상풍력 기초 모형실험

### ● 점성토 지반 조성

- 인도네시아산 카올리나이트
- 카올리나이트와 물을 함수비 110%로 혼합  
(카올리나이트 : 물 무게 = 100 : 110)



150L x 5

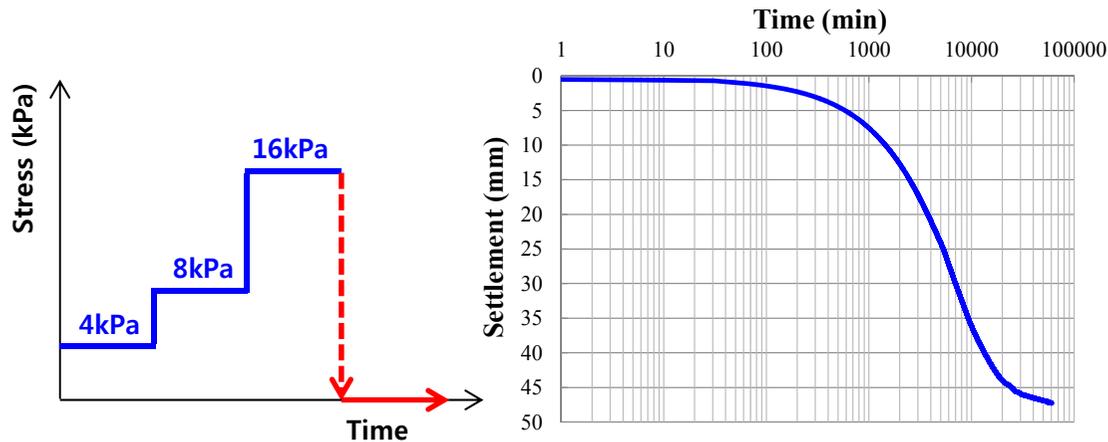
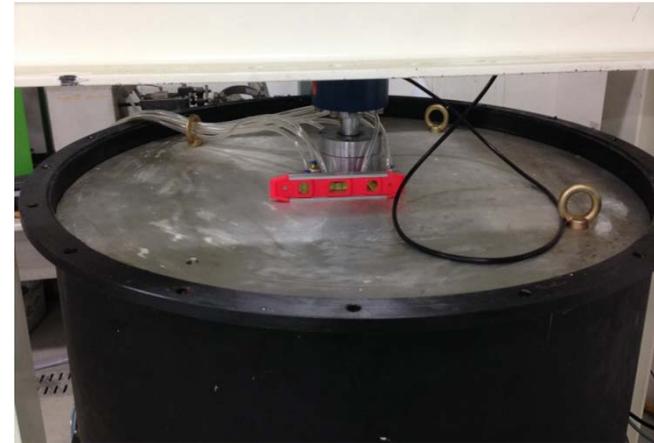
- 토조 바닥에 filter paper 부착
- 믹싱된 점토를 대형 토조에 채움





## 해상풍력 기초 모형실험

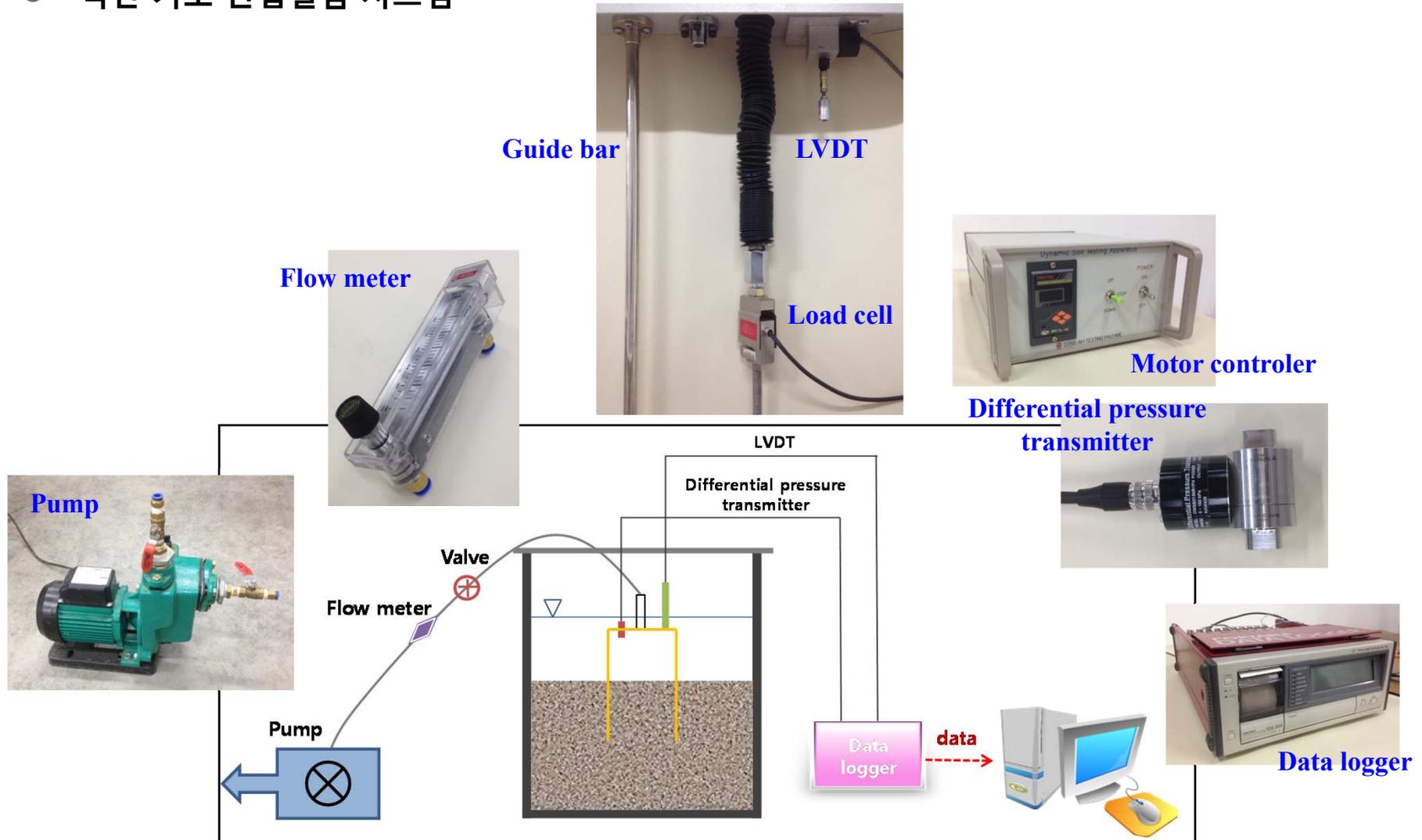
- 점성토 지반 조성
  - 프레임 상부 전동기를 사용하여 지반 압밀
  - 단계별 하중 재하 (하중 컨트롤)
  - 압밀 완료 후 부의 간극수압 소산을 위하여 시간 경과 단계: 4kPa → 8kPa → 16kPa  
단계마다 1차 압밀이 종료되는 시점까지 압밀





# 해상풍력 기초 모형실험

- 석션 기초 관입실험 시스템





# 해상풍력 기초 모형실험

- 석션 기초 관입실험 과정



Initial position



Weight penetration



Pump is connected



Suction penetration



Rod is disassembled

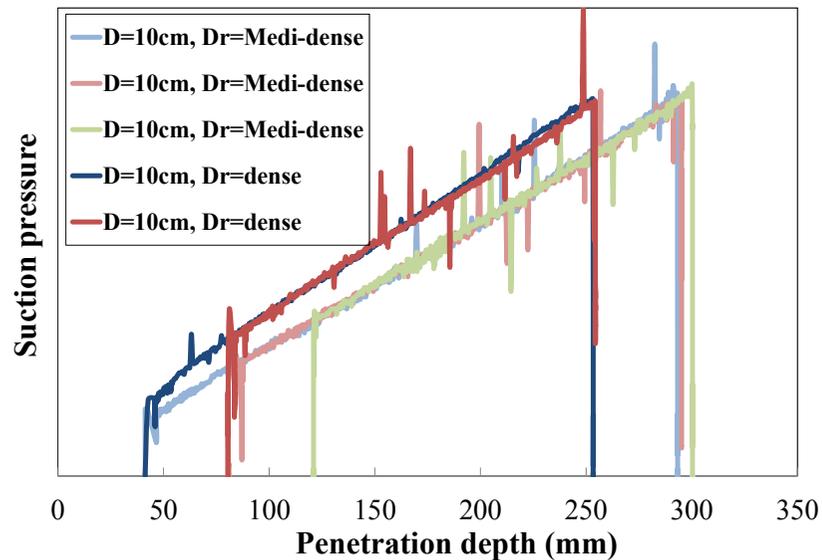


## 해상풍력 기초 모형실험

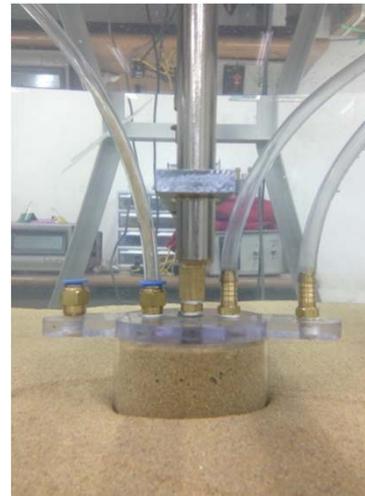
### ● 석션 기초 모형실험 결과

#### ● 사질토 지반 관입실험 결과

- 관입 깊이에 따른 석션압 변화 측정
- 사질토 지반 상대밀도(Relative density)에 따른 석션압 차이 분석
- 설계 시 히빙량 예측을 위한 계수( $\alpha$ ) 도출



관입 깊이에 따른 측정 석션압



관입 후 히빙 발생 모습

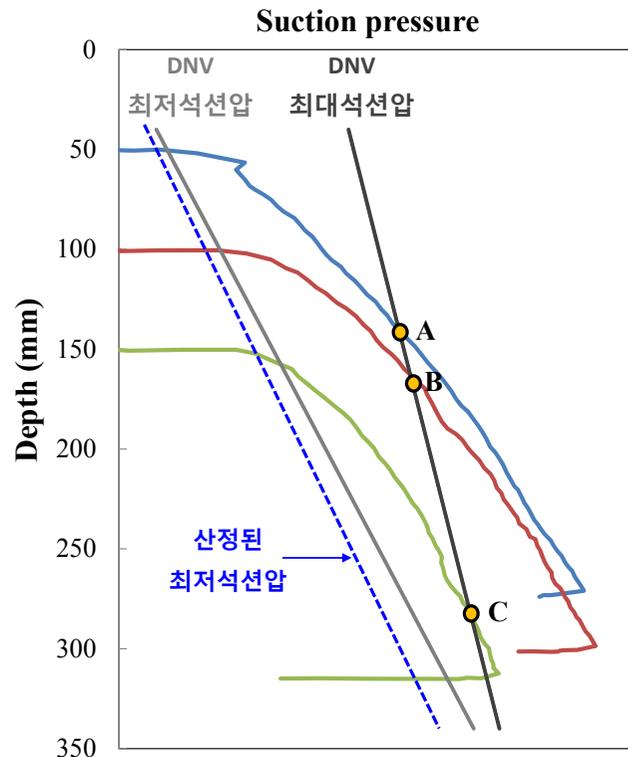
$$\delta = \alpha (A_t / A_s) d$$

- $\delta$  : height of heave
- $\alpha$  : correction factor for heaving
- $A_t$  : area of the pile tip
- $A_s$  : area of the pile top
- $d$  : penetration depth

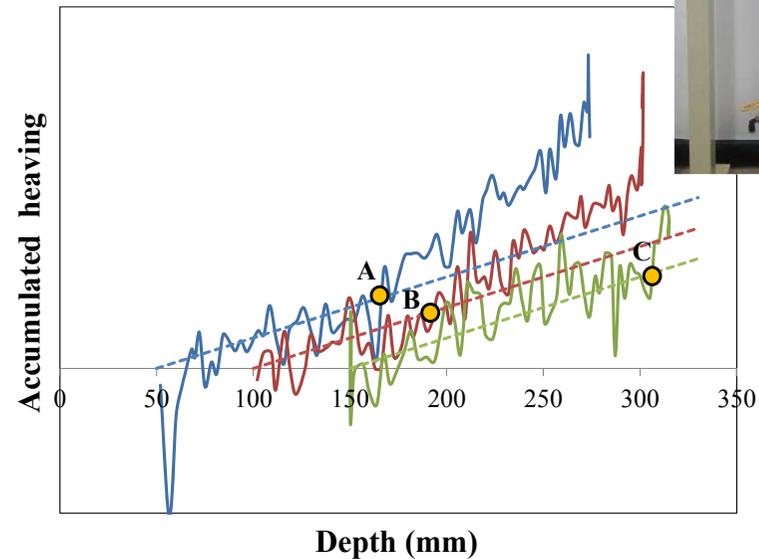


# 해상풍력 기초 모형실험

- 점성토 지반 관입실험 결과
  - 실험으로 측정된 석션압과 **DNV 코드에 제안된 설계석션압 산정식** 계산 결과를 비교
  - 석션기초 관입 시 내부 히빙량(heaving)량 측정 → **최대석션압 비교 시 사용**



측정된 석션압과 설계석션압 비교



관입깊이에 따라 측정된 히빙량





## 해상풍력 기초 모형실험

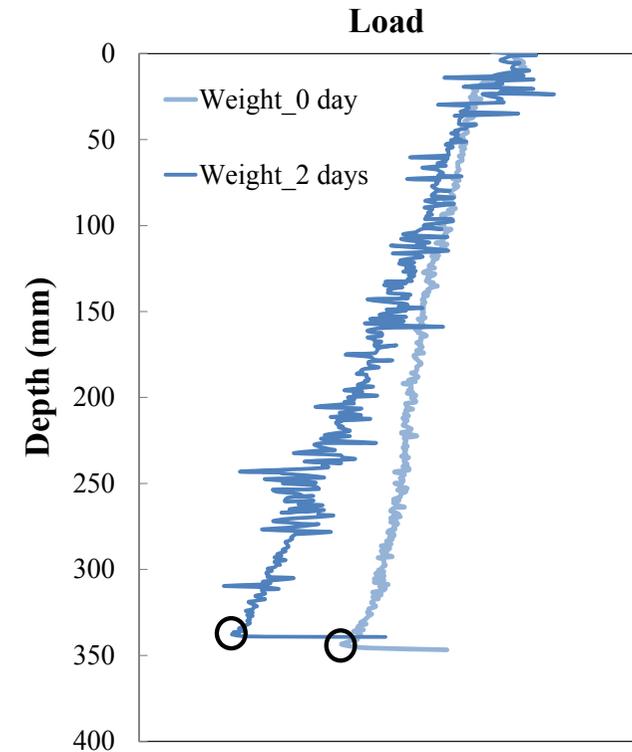
- 인발지지력 측정 실험 결과
  - 석션기초 관입 후 시간경과정도에 따른 인발지지력 변화 측정
  - 시간경과 효과(set-up effect)가 석션기초 지지력에 미치는 영향 분석



석션 기초 관입 후 모습



관입 후 인발지지력 측정

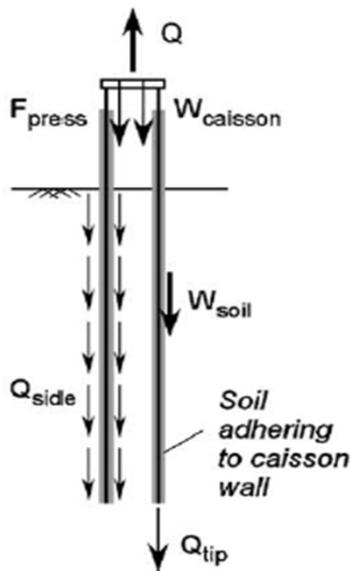


인발지지력 측정 결과

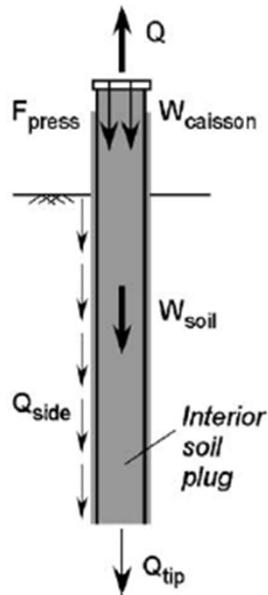


## 해상풍력 기초 모형실험

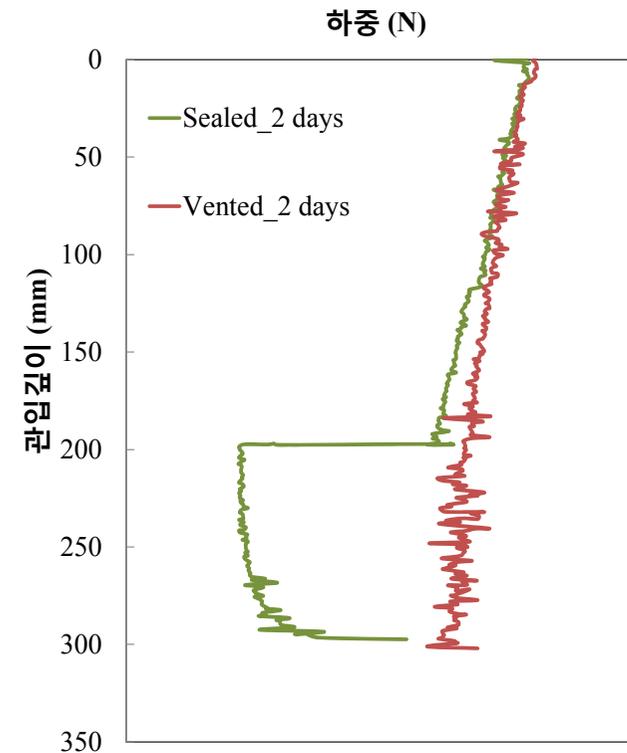
- 인발지지력 측정 실험 결과
  - 관입하여 설치된 석션기초의 상판 밸브를 열고, 닫은 후 인발함
  - 밸브 개·폐 여부에 따라 인발지지력 발생 메커니즘이 다름
  - 밸브를 닫은 경우, 석션관입 후 기초 내부에 부압(negative pressure)이 유지되므로 인발하중에 대한 저항력이 큼



Vented 상태 (밸브 open)



Sealed 상태 (밸브 closed)



인발지지력 측정 결과

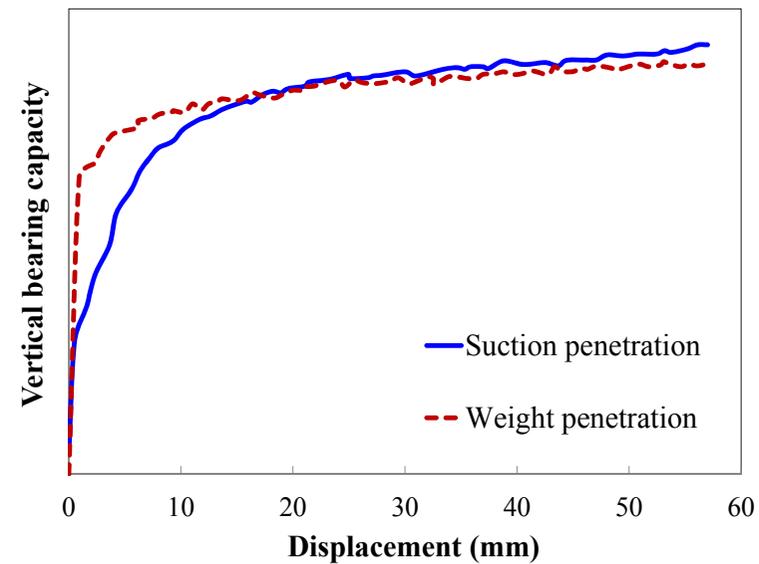


## 해상풍력 기초 모형실험

- 수직지지력 측정 실험 결과
  - 석션기초의 하중관입(weight penetration)과 석션관입(suction penetration) 후 수직 압축지지력 측정
  - 다른 관입 방법 적용 후 지지력 차이 분석
  - 극한지지력이 발현되기 이전 초기 강성(기울기)에서 차이를 보임



석션 기초 관입 후 수직지지력 측정



수직지지력 측정 결과



## 요약

- 해상풍력 파일 설계 기준
  - Allowable stress (API-WSD)
  - LRFD (API-LRFD, ISO, DNV, IEC, GL)
    - ULS - 지지력 + 변위
    - SLS - 변위
- 해상풍력 파일별 설계 방법
  - 중력식 - 얇은 기초와 유사함
  - 모노파일 - 파일 기초와 유사함
  - 버킷기초 - 얇은 기초와 모노 파일 중간 형태
  - 자켓기초
  - 석션파일



## 요약 및 향후 연구 방향

- 향후 연구 방향
  - 반복하중으로 인한 강도 및 강성 저하
    - 설계하중 작용시 발생 변형률에서의 강도 및 강성 저하 특성 연구
    - 이를 고려한 설계방법 제시
      - silt, silty sand, clay
    - 허용변위
  - 대형 버킷기초의 설계 방법
    - 하중 전달 특성 규명
    - 복합지반에서의 지지력 및 변위 특성
    - 보다 직관적인 지지력 설계식
    - 비선형 해석 및 계측자료 비교를 통한 대형 버킷의 p-y, t-z, q-z 곡선 개발
    - 동적 거동 특성 규명
      - 대형 버킷 기초의 동적 지반-구조물 상호작용 규명
      - 연속체 해석 - 동적 p-y 해석 - 등가 스프링 비교
      - 운영중 및 극한하중 고유주기



## 요약 및 향후 연구 방향

- 지반 조사
  - 설계시 가장 중요
  - CPT – FV
  - 탄성파 시험
  - 현장토 샘플링
  - 반복재하시험
    - 반복삼축시험
    - 반복전단시험



## 참고문헌

- 윤희정, 권오순, 이광수 (2009), "해상풍력발전 기초 설계기준서 비교," 2009 대한토목학회 정기학술대회, pp.863~866.
- 한국건설기술연구원 (2011), 대구경 대수심 해상기초시스템 기술 개발 1차년도 보고서.
- 한국에너지기술평가원 (2011), 천해용[40m 이내] 해상풍력 Substructure 시스템 개발, 상세기획보고서.
- 한국지반공학회 (2014), 지반기술자를 위한 해상풍력 기초설계.
- Achmus, M., Akdag, C.T., Thieken, K. (2013), "Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand", Applied Ocean Research, pp.157~165.
- API (2007), Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platform – Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21<sup>st</sup> ed.
- API (1993), Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platform – Load and Resistance Factor Design, American Petroleum Institute.
- Bang, S., Cho, Y. (2000), Use of Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases – Task 3 Completion Report: Analysis and Design Methods of Suction Piles, A report prepared for the Naval Facilities Engineering Service Center.
- Bjerrum, I. (1963), Discussion to European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Wiesbaden), Vol. 2, p.135.
- Byrne, B.W., Houlsby, G.T. (2003), "Foundation for Offshore Wind Turbines, Phil," Trans. R. Soc. Lond. A 306, pp.2909~2930.
- DNV (2005), "Geotechnical design and installation of suction anchors in clay", DNV Recommended Practice RP-E303, Høvik, pp.
- DNV (2011), Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV-OS-J101. Oslo, Norway.
- European Wind Energy Association (2009), Europe's Onshore and Offshore Wind Energy Potential.
- GL (2005), Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbine.
- Houlsby, G.T., and Byrne, B.W. (2004), Design Procedures for Installation of Suction Caisson in Sand, University of Oxford, Report No. OUEL 2268/04, pp.
- Hung, L.C., Kim, S.R. (2014), "Evaluation of Undrained Bearing Capacities of Bucket Foundations Under Combined Loads", Marine Georesources & Geotechnology, pp.76~92.
- IEC (2009), IEC61400-3, International Standard. Part3 : design requirements for offshore wind turbines, Project IEC 61400-3. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization (2007), ISO 19902.
- Randolph, M., Gourvenec, S. (2011), Offshore Geotechnical Engineering, Taylor & Francis Group.
- Saigal, R.K., D. Dolan, Kiureghian, A.D., Camp, T., Smith, C.E. (2007), "Comparison of Design Guidelines for Offshore Wind Energy Systems," Offshore Technology Conference, Houston, TX.

# Thank you for your attention!

박두희

e-mail: [dpark@hanyang.ac.kr](mailto:dpark@hanyang.ac.kr)

박정선

e-mail: [jpark86@hanyang.ac.kr](mailto:jpark86@hanyang.ac.kr)



**GSR**  
GEO SYSTEM RESEARCH GROUP

Department of Civil and Environmental Engineering  
Hanyang University



<http://civil.hanyang.ac.kr/gsr>