

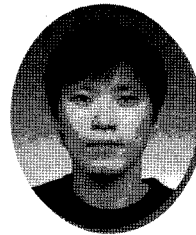
해양풍력 기초의 종류 및 이해



박현일
삼성건설기술연구소, 수석연구원
(hyunil77.park@samsung.com)



김동준
현대건설 기술/품질개발원 과장



추연욱
KAIST 건설및환경공학과 연구교수

1. 서론

최근 석유 등의 화석에너지 자원 가격의 불안정으로 인하여, 대체 에너지에 대한 수요가 증가하고 있고, 녹색성장·친환경·CO₂저감이라는 범세계적인 키워드와 접목되어 신재생 에너지원 개발이 활발하다. 이중 가장 경쟁력이 있는 풍력발전의 경우, 전 세계 신재생 에너지 투자액의 약 45%를 차지하고 있으며 연평균 20% 이상의 고성장 산업으로 주목 받고 있는 가운데, 풍력자원이 풍부하고 대규모 단지건설이 가능한 해상 풍력시장이 확대되고 있는 추세이다. 현재 세계 해상풍력 설치 용량은 유럽을 중심으로 2.9GW이나, 2.6GW가 건설 중이고 승인된 계획이 23.6GW이며, 세계 각국에서 준비하고 있는 규모는 총 150GW(약 3,700억불 규모)를 넘어서고 있어, 전세계의 육상풍력 설치용량에 맞먹는 규모(2009년 당시 159GW규모)가 준비되고 있다. 특히, 전통적인 개발 지역인 유럽 외에도, 미국, 중국 등이 국가적으로 해상풍력발전단지 개발을 추진하고 있다(지식경제부, 2010). 국내에서도 신재생에너지 의무할당제(RPS, Renewable

Portfolio Standard) 국회 상임위 통과(2010.03)와 함께 지식경제부는 지난 11월 해상풍력 추진 로드맵을 통하여 2019년까지 9.2조원 투자계획과 서남해안에 2,500MW 규모의 해상풍력단지 개발계획을 발표하였다. 이와 같이 국내에서도 해상풍력단지 개발은 초기 단계이나, 지속적인 수요와 투자가 예상되고 있다.

해상풍력타워의 경우 기초구조물이 초기 공사비에서 큰 비중을 차지하여 경제적인 기초공법에 대한 연구가 중요시 되고 있다. 육상풍력단지의 건설 비용 중 약 3/4이 터빈 관련 비용이며, 기초구조물 비용은 10% 미만(EWEA, 2008)인 것에 비해, 해상풍력타워의 경우 하부 구조 및 기초의 비용이 건설비의 1/4 ~ 1/3을 차지할 정도로 비중이 높다(EWEA, 2009A). 대표적인 기초 형식으로는 중력식 기초, 모노파일 기초, 트리포드형 기초, 석션 케이스 기초형식 등을 적용되고 있다. 유럽에서는 해상풍력타워의 기초로서 모노파일(강관 단말뚝)이 널리 활용되어 왔고, 현재까지는 10 ~ 20m이내에서 가장 활발히 적용되고 있다. 반면, 해상풍력단지가 조성되는 수심이 증가하면서 타입형 모노파일형식의 기초에 어려움이

예측되고 있어, 30m이상의 대수심에 적합한 기초 및 하부 구조 공법을 적용하기 위한 시도가 이루어지고 있으며, 원 유 시추선 등 심해 해양 구조물에 주로 적용되었던 석션 기초(벡터 기초)를 해상풍력타워에 활용하기 위한 연구가 수행되고 있다.

2. 풍력기초 설계

풍력기초의 설계에서는 강성도, 강도, 안정성, 부등침하, 내구성, 경제성이 매우 중요한 설계요소라 할 수 있다. 기초의 회전강성은 연성 노반(subgrade)과 연성 콘크리트 기초간의 지반구조물 상호작용에 의존한다. 일반적으로 터빈 제조사에서는 최대침하 혹은 속도 등과 같은 구체적인 기준 등을 제공하지 않으며, 필수 기준으로 최소 회전 강성도만을 제공한다. 따라서, 설계자들은 지반의 감쇠비 등과 같은 동적 특성에 대한 적합한 고려를 통하여 보다 경제적인 설계를 추구하고 있다. 확대기초(spread footing)는 일반적으로 탄성 반무한(elastic half-space) 혹은 다층 구조(multilayer space)를 갖는 강성기초로 가정되어 설계되고 있다. 풍력기초는 터빈의 극한 하중에 지지할 수 있어야 하며, 동시에 운영 중 피로

하중 및 터빈의 작동/중지에 따른 거동에도 지지할 수 있도록 설계되어야 한다. 터빈 제조사에서는 기초 설계에 필요한 하중에 대한 기준들을 제공하고 있다. 확대기초의 안정성은 극한하중 하에서 과도한 거동(회전, 수평이동)에 대하여 만족되어야 함을 의미한다. 대부분의 경우, 전도 및 지지력에 대하여 검토되며 수평 미끄러짐에 대하여 검토된다. 터빈 제조사에서는 부등침하에 대한 기준을 제공하고 있다. 침하의 경우, 회복가능한 탄성침하를 의미하는 단기(short-term) 부등침하와 소성(plastic) 및 압밀(consolidation)과 같은 회복되지 않는 장기(long-term) 부등침하가 고려되어야 한다. 터빈의 사용기간 동안 발생할 수 있는 외부적인 환경에 대하여 기초 내구성이 확보되어야 한다. 즉 부식 보강, 염해 등과 같은 콘크리트의 화학 특성 검토, 동결/융해 등과 같은 인자들이 검토되어야 한다. 또한 기초 형식 뿐만 아니라 기초의 형태를 최적화 함으로써 경제성을 확보할 수 있다. 특히, 기초 설계시 굴착심도와 콘크리트 체적 간의 적절한 선정을 통하여 경제성이 영향을 받게 된다.

해상 풍력기초를 설계하기 위해서는 기존 석유나 가스의 시추를 목적으로 해상에 설치된 많은 해상구조물들의 기초설계 기술을 사용할 수 있다. 실제로 전용 해상 풍력 설계서들(Det Norske Veritas (DNV), 2007;

표 1. 해상 풍력발전 건설에 적용가능한 설계서 비교(윤희정 등, 2009)

	국내항만 및 어항설계 (2005)	일본 해상 풍력 발전의 기술 매뉴얼 (2001)	API RP2A (1993, 2000)	DNV-OSJ101 (2007)	GL (2005)	IEC 61400-3 (2008)
목적	항만시설 설계서	해상풍력발전기 전용설계서	해상구조물 범용설계서	해상풍력발전 전용설계서	해상풍력발전 전용설계서	해상풍력발전 전용설계서
극한하중	불명확	파랑: 30-50년 풍속: 50년	100년 주기	50년주기	50년주기	50년주기
하중 사례수	불명확	2개(지진시/폭풍시)	불명확	31개	44개	33개
한계 상태	미포함	미포함	ULS SLS	ULS SLS	ULS SLS	ULS SLS
해석 방법	허용응력 설계	허용응력 설계	허용응력설계 한계상태설계	한계상태 설계	한계상태 설계	한계상태 설계
지지력 계산	어항설계서의 지지력 산정식	일본 항만시설기준의 지지력산정식	API 방법	API 방법; 다른 공인된 표준	API 방법; 다른 공인된 표준	ISO 19902

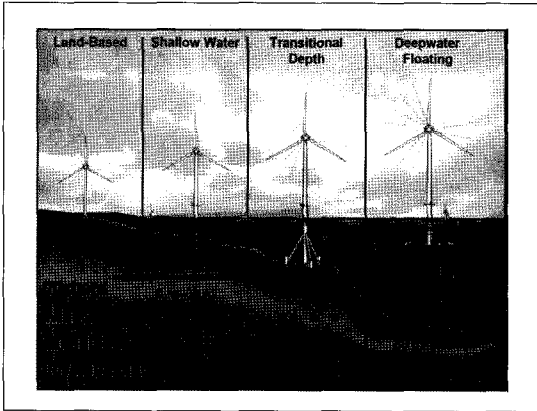


그림 1. 해저 심도별 풍력기초 형식

Germanischer Lloyd (GL), 2005; IEC, 2008)을 검토해 보면 해상 풍력기초 설계를 위해 새로운 지지력 예측방법을 제안하기 보다는 기존의 API RP2A (1993, 2000)나 ISO 19902 (2007)등의 석유시추 해상 구조물 기초부분을 참조하도록 되어 있다. 각각의 설계기준들은 서로 다른 목적으로 만들어졌다. 윤희정 등(2009)은 각 설계기준들에 대한 설계 요소 및 차이점 등을 표 1과 같이 정리하였다.

3. 풍력기초 형식

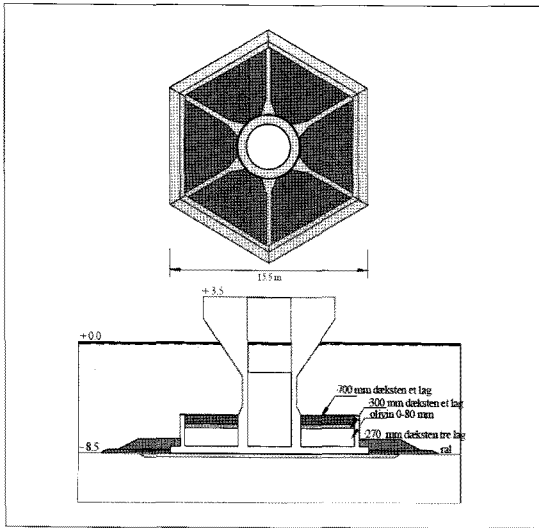
풍력터빈의 기초형식은 지반조건, 수심, 부식, 풍력터빈의 크기 및 형식, 파고높이, 결빙, 정책 등과 같은 다양한 설계인자들에 의하여 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Feld, 2004). 최근 유럽에 시공된 해안 풍력단지 PJT들은 중력식 기초 및 모노파일 기초형식에 의하여 시공되었다. 모노파일 형식은 Horns Rev, Samsø, North Hoyle 및 Kentish Flats에 적용되었으며, Nysted 및 Middelgrunden의 PJT들에는 중력식 기초형식이 적용되었다. 향후에는 풍력터빈 시설들의 규모가 커지고, 시공 수심도 보다 깊어질 전망이다. 또한 40m 수심의 적합한 지반에 석션 케이스 기초형식이 적용가능하다고 보고되기도 하였다. 그림 1에는 수심 0~50m의 얇은 수심에 적용가능한 터빈기초 형식들이 나타나 있다.

3.1 중력식 기초(Gravity based foundation)

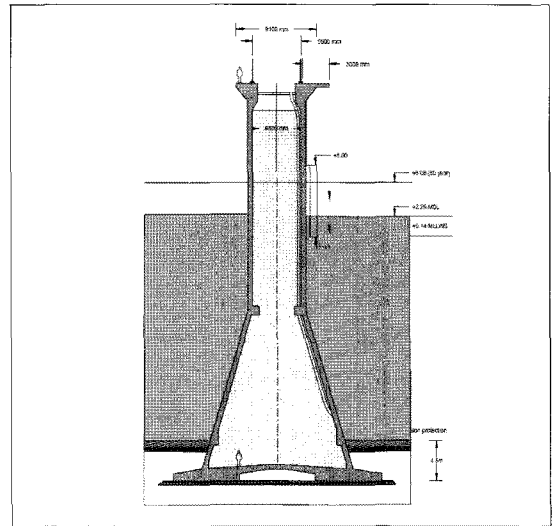
Nysted 해안 풍력단지 및 Tunoe Knob 풍력단지는 전통적인 중력식 콘크리트 기초형식으로 조성된 대표적인 예라 할 수 있다. 일반적으로 케이스 기초들은 건조 도크(dock)에서 보강콘크리트로 제조되어 기초설치지점으로 운반되어 모래·자갈을 채워서 해저면에 안착시키는 방법으로서 기존의 전통적인 케이스 교량기초 시공과 거의 동일하다고 할 수 있다. 일반적으로 콘크리트 기초형식을 사용할 경우에 기초시공 비용은 대체적으로 수심에 제곱에 비례한 것으로 알려져 있다. 덴마크 Lolland의 남부해안으로부터 10km 지점에 위치한 Nysted 해안 풍력단지의 중력식 기초의 설계 및 시공은 계약자 및 설계자 간의 협의 결과로 도출된 대표적인 예중의 하나이다. 호박돌(boulder)이 다량 함유된 지반조건으로 인하여 당초 선정된 모노파일 형식보다는 중력식 기초형식이 보다 적합한 것으로 판단되었다. 효율적인 콘크리트 기초 구조물의 운반 및 설치를 위해 중량을 최소화하고자 6개의 개방형 격실로 설계되었다. 그림 2에는 설계단면(바닥 너비 = 15m, 최대높이 = 16.25m)이 나타나 있다. 콘크리트 중량은 해상운반에 적합하도록 1300ton이하로 설계되었다. 미끄러짐(sliding)과 전도(overturning)에 대한 안정성을 확보하기 위하여 격실 및 shaft 내부에 500ton 가량의 중량물이 추가 충전되었다. 벨기에의 Thornton Bank에는 총 60개의 풍력 터빈이 4×6 및 6×6 배열로 설치되었다. 기초 형태는 그림 3에 나타난 바와 같이 터빈 하중이 바닥 슬래브로 직접 전달될 수 있도록 상부 폭이 좁은 원통형으로 설계되었다. 구조체에 선형 강성을 제공하고 피로 및 균열을 피하기 위하여 포스트텐션을 적용하였다. 기초 저면부 폭은 21m이고, 상부기둥의 폭은 6.5m이며, 구조체 중량은 대략 2700ton이다. 전도에 대한 안정성을 확보하기 위하여 모래 등과 같은 균형 중량물(ballast)이 충전되어, 건조중량이 최대7000ton 정도이다.

3.2 모노파일 기초(Monopile foundation)

모노파일 기초형식은 풍력기초 형식으로 가장 일반적



(a) Nysted 해안 풍력단지



(b) Tunoe Knob 풍력단지

그림 2. 실제 시공된 중력식 기초 형식 예

으로 사용되고, 국내외적으로 상용화되었다. 특히 타기초 형식에 비하여 경제적인 공법이다. 모노파일이 적용되는 심도는 대체로 수심 25m까지 적용가능하고, 직경 2~5.0m의 강관말뚝으로 항타 혹은 굴착 시공이 가능하다. 특히 해저지반 저면을 정리할 필요 없이 시공 가능하고, 제작이 상대적으로 간단한 것이 장점이다. 그러나, 호박돌이 분포한 지반조건에서는 항타가 불가능하여, 설치를 위한 특수장비가 필요하다.

3.3 트라이포드 기초(Tripod Foundation)

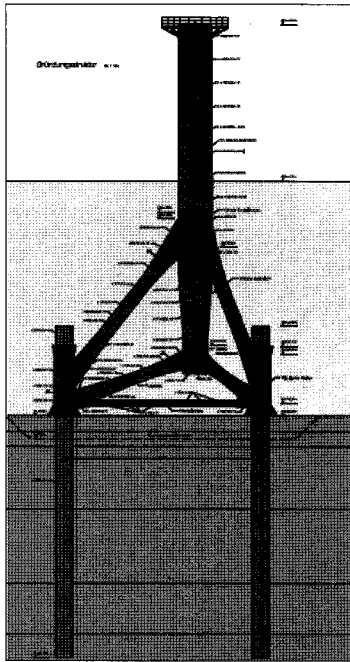
트라이포드 기초형식은 수심이 대략 30m 이상인 경우에 적합하다고 알려져 있다. 이 형식은 스웨덴의 Nogersund에 처음 설치되었다(Larsson, 2000). 기초 형태는 중앙 기둥과 해저면에 설치된 세개의 파일로 구성되어 있다. 특히 다른 기초형식들과 비교하여 세굴에 대한 검토가 필요치 않다. 직경 2.0~3.0m 이내의 강관말뚝을 항타 후에 콘크리트로 충전하여 결합하며, 호박돌이 분포된 지반에서는 항타가 어렵다. 큰 용량의 터빈 사용이 가능하나 제작 및 설치비가 상대적으로 고가이며, 브레이스 부재로 인하여 선박 접근이 용이치 않다. Alpha

Ventus 해상풍력단지 프로젝트는 독일 Borkum 섬 인근 45km 지점에서 2009년도에 5MW급 AREVA Multibrid 터빈에 대한 6개의 기초들이 시공되었다. 트라이포드 기초의 높이는 40m이고 중량은 700ton 이상이다. 트라이포드의 세개 다리는 45m 길이의 설치된 말뚝에 고정된다.

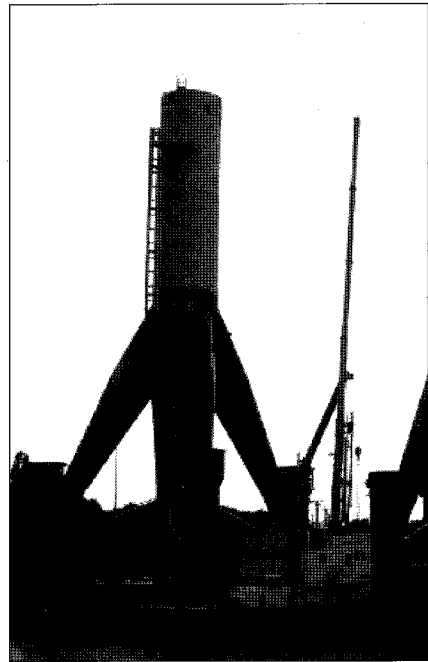
3.4 석션 케이스 기초(Suction caisson)

석션 기초 공법은 상부가 밀폐된 케이스 형태의 기초로써 뒤집어진 버켓과 모양이 유사하여 버켓 기초라고도 불리며, 활용 형태 및 연구자에 따라 석션 케이스, 석션 파일, 석션 앵커 등으로 불린다. 석션 기초 공법은 케이스 내부의 물을 외부로 배수하여 압력을 낮춤으로써 외부의 수압과 내부의 압력의 차이를 이용하여 관입이 이루어진다. 따라서 관입을 위한 별도의 대형 장비가 필요하지 않고 수심이 깊어지고 크기가 커질수록 발생하는 관입력을 높일 수 있으므로 대수심 조건에서 적용에 유리하며, 빠른 시공속도와 사용을 완료한 후 인발하여 제거가 가능하다는 장점이 있다(국토해양부, 2009).

석션 기초 공법의 장점을 활용하여 해상풍력타워에 석

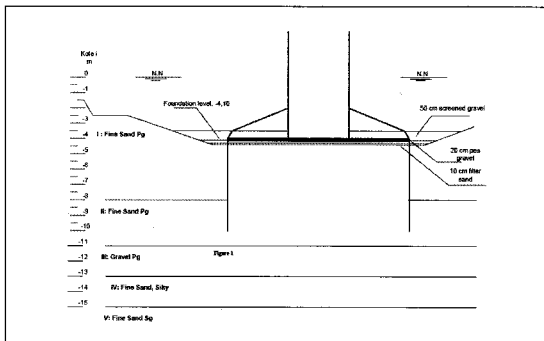


(a)

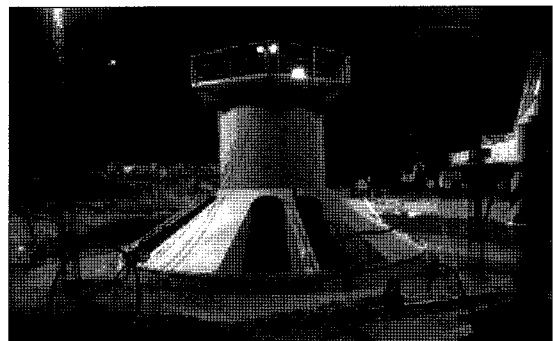


(b)

그림 3. 실제 시공된 Tripod 기초형식 예



(a)



(b)

그림 4. 시험용 해상풍력타워 석션 케이스 기초 단면도 및 시공(Ibsen, 2005)

선 기초 공법을 적용하려는 연구가 활발하게 이루어져 왔으며(Houlsby, 2000; Houlsby, 2005; Senders, 2005), 석션 케이스 적용시 일반적인 모노파일 적용시보다 강재의 양을 절반으로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다(Ibsen, 2005). 최근에는 원심모형시험을 활용하여 모래 및 다층 지반 조건에서의 설치 및 지지력에 대한 연구가 이루어졌다(Senders, 2005; Tran, 2008). 덴마크에서는

석션 기초 공법(직경 12m, 길이 6m, 두께 25~30mm, 강재)을 적용하여 3MW급 터빈 및 타워를 설치하고 3년 여에 걸쳐 장기 계측을 시행하였다(Ibsen, 2005). 해상 작업에 적합하고 사용 후 제거가 가능한 석션 기초 공법의 특성을 활용하여, 최근에는 해상풍력단지 설계를 위한 기상 관측 타워에 석션 기초를 적용하여 재사용이 가능하도록 한 mobile met tower가 덴마크의 Horns Rev 2 해상

풍력단지에 시험 적용되었다. 시험 시공 결과 설치 선박의 jack-up으로부터 총 32시간이 소요되어, 모노파일을 적용한 경우와 비교하여 유사한 시간이 소요되는 것으로 나타났고, 시공 최적화를 통하여 10시간 이내에 완료할 수 있을 것으로 예상되었다(Bakmar, 2009). 홍콩 해상풍력단지에서는 항타 및 해상 작업으로 인한 수질 오염 문제를 고려하여 석션 기초 공법을 기본 안으로 채택하고 시험 시공을 수행하였다(Hong Kong Offshore Wind Limited, 2009).

4. 맺음말

우리나라의 경우 제주도 동서부, 백두대간 주변 고산지역, 서·남해 다도해 지역 등에 풍력자원이 우수한 것으로 알려져 있다. 향후 국내 해상풍력발전의 활성화와 관련산업의 발전을 위해서는 우선적으로 시범사업을 통하여 실적 및 설계·시공·운영·유지관리에 대한 기술을 확보하여야 할 것이다. 해상풍력발전의 터빈 용량이 계속적으로 증가되고 있으며, 단지가 건설되는 수심이 점차 깊어짐에 따라, 기초 및 하부구조물 건설비의 비중이 계속적으로 증가될 것으로 예상되므로, 설계, 시공 및 장비에 대한 기술 개발이 중요하다. 국내에서도 대구경 대수심 해상기초시스템 기술개발 연구단(주관: 한국건설기술연구원, 협동: 한국해양연구원)을 비롯한 관련 연구가 활발하게 수행되어 해상풍력발전의 경제성 향상에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 해상 조건에서의 시공중 안정성 향상과 공기 단축을 위한 시공 기술 개발과 해상풍력타워 설치에 적합한 전용 장비의 개발 및 확보도 중요한 요소이다.

최근 독일에서는 해상풍력타워 기초 시공으로 인한 타 소음 등이 해양 생태계에 피해를 줄 수 있다는 문제가 제기된 바 있다(KOTRA, 2010). 국내 및 해외에서 해상풍력단지의 건설이 활성화 됨에 따라 유사한 사례가 발생될 수 있다. 따라서, 국제 경쟁력 향상 및 해상풍력발전의 보급을 촉진하기 위해서는 친환경적인 기초 및 하부구조에 대한 기술 개발이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2009), 대수심 방파제 및 연약지반 관련기술 최 종연구보고서
2. 지식경제부 (2010), 해상풍력 추진 로드맵 보드자료
3. 한국항만협회 (2005) "항만 및 어항 설계기준," 발간번호 11-1520000-000842-14
4. KOTRA (2010), 해외시장동향 분석 자료
5. API RP-2A (1993) "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-LRFD," API RP-2A-LRFD.
6. API RP-2A (2000) "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design," API RP-2A-WSD, 21st edition.
7. Det Norske Veritas (DNV) (2007) "Design of offshore wind turbine structures," DNV-OS-J101. Oslo, Norway.
8. EWEA (2008), The Economics of Wind Energy, A Report by the European Wind Energy Association.
9. EWEA (2009), Oceans of Opportunity, Harnessing Europe's Largest Domestic Energy Resource.
10. Germanischer Lloyd (GL) (2005) "Rules and guidelines industrial services IV-2. guideline for the certification of offshore wind turbines." Hamberg Germany.
11. Hong Kong Offshore Wind Limited(2009), Hong Kong Offshore Wind Farm in Southeastern Waters - Executive Summary, pp.1~21.
12. Houslsby, G.T. and Byrne, B.W.(2000), "Suction Caisson Foundations for Offshore Wind Turbines and Anemometer Masts", Wind Engineering, Vol. 24, No.4, pp. 249~255.
13. Housbly, G.T. and Byrne, B.W.(2005a), "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand", Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Geotechnical Engineering, Vol. 158, pp.135~144

14. Ibsen, L.B., Liingaard, M. and Nielsen, S.A.(2005), "Bucket Foundation, a status"
 15. IEC (2008) "Final Draft International Standard-part 3: design requirements for offshore wind turbines," Project IEC 61400-3.
 16. Larsson, A-K (2000): Försöksanl ägning för havsbaserad vindkraft i Nogersund [Offshore Wind Pilot Project in Nogersund]

17. Senders, M. Randolph, M., Gaudin, C., (2007), "Theory for the Installation of Suction Caissons in Sand Overlaid by Clay," Proceedings of the 6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge, London, UK.

한국지반공학회 터널기술위원회 계속교육 안내

- 일 시 : 2011. 2. 23(수) ~ 24(목) (2일간) 09:30 ~ 18:00
- 장 소 : 한국교원단체총연합회(서울 우면동 소재)
- 교육주제 : 터널의 환기와 방재설계(가칭)
- 주 최 : 터널기술위원회
- 접 수 : 120명 선착순
- 교 육 비 : 12만원(회원), 15만원(비회원) (중식 및 교재 제공)

일자	시간	내 용	연사 (예정)
23일	9:00~9:30	터널 환기와 방재 현황 및 향후 전망	김상환 교수/이인기 사장
	9:30~11:10	도로터널의 방재 개론 및 설계	신태균 사장
	11:20~13:00	도로터널 정량적 화재위험도 평가기법	유지오 교수
	13:00~14:00	점심	
	14:00~15:40	터널 유체역학 기초	윤성욱 박사
	15:50~17:30	도로터널의 환기개론 및 설계	김효규 사장
	17:30~18:00	종합토의/질의응답	황제돈 사장
24일	9:00~10:40	철도터널의 환기개론 및 설계	조형제 이사
	10:50~12:30	철도터널의 방재개론 및 설계	김동현 박사
	12:30~13:30	점심	
	13:30~15:10	터널의 내화구조 개론 및 설계	유지오 교수
	15:20~17:00	터널의 전기설비 개론 및 설계	김홍열 박사
	17:00~18:00	종합토의/질의응답	이완규 상무