

해상풍력발전 버켓기초공법의 경제성 평가

오명학^{1*}, 권오순¹, 김근수¹, 장인성¹
¹한국해양연구원 연안개발에너지연구부

Economic Feasibility of Bucket Foundation for Offshore Wind Farm

Myounghak Oh^{1*}, Osoon Kwon¹, Keun-Soo Kim¹ and Insung Jang¹

¹Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute

요약 풍력발전기의 용량이 점차 대형화되고 해상풍력단지 수심이 깊은 곳에 조성됨에 따라 해상풍력발전구조물의 하부구조 및 기초시공비용 또한 급격히 증가될 것으로 예상된다. 석션버켓기초는 버켓형식의 기초를 자중에 의한 관입과 자중관입 이후 석션에 의한 관입으로 설치하는 공법이며, 대형장비 대신 충분한 용량의 펌프만 있으면 기초의 시공이 가능하므로 시공이 간편하고 경제적인 공법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 석션버켓기초의 경제성을 검토하기 위하여 상부지반이 사질지반과 연약지반인 경우일 때 대수심 조건에 적용 가능한 기초형식인 자켓과 석션버켓기초를 적용한 트라이포드의 시공비용을 비교하였다. 그 결과 지반이 단단하고, 기초개수가 증가할수록 자켓형식보다는 트라이포드 버켓기초형식을 적용하는 것이 더 경제적임을 확인하였다.

Abstract As the turbine capacity and the water depth of wind farms are increasing, the construction cost of substructures and foundations for offshore wind turbines is expected to increase. Since the installation of suction bucket foundation is achieved by both self-weight and applied suction, the construction generally does not require heavy equipment for penetration. This study provides an economic analysis on the tripod which have the bucket foundations and compares that the jacket foundation at 50m water depth on sand layer or soft layer. As the strength of the soil and the number of the foundation is increasing, the construction cost of the tripod with the bucket foundations is more economically feasible than the jacket foundation.

Key Words : Offshore wind farm, Bucket foundation, Economic feasibility, Tripod

1. 서론

화석에너지의 고갈과 지구온난화 및 환경오염은 전세계적으로 녹색성장·친환경·CO₂저감을 위한 신재생에너지원의 개발을 촉진시켰다. 신재생에너지원 가운데 풍력은 발전단가 측면에서 화력, 원자력 등 기존 에너지원에 가장 근접해 있는 기술이다[1]. 이러한 영향으로 풍력발전은 전 세계 신재생 에너지 투자의 약 45%를 차지하고 있으며, 연평균 20% 이상의 고성장 산업으로 주목받

고 있다. 세계 해상풍력 설치 용량은 유럽의 경우 2010년 12월 기준으로 2.9GW에 불과하나, 2.6GW가 건설중이고 승인된 계획도 23.6GW이며, 세계 각국에서 준비하고 있는 규모는 총 153.9GW나 된다. 최근에는 미국, 중국 등에서 국가적으로 해상풍력발전단지 개발을 추진중이다[2].

해상풍력발전은 육상풍력발전에 비하여 기술적·경제적으로 고려해야 하는 사항이 많으나, 해상이 육상보다 풍력자원이 풍부하고 풍력감소가 상대적으로 작을 뿐만 아니라 대형단지를 조성하기가 용이하여 전기 출력량이

본 논문은 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2010건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Myounghak Oh

Tel: +82-10-4153-8119 email: omyhak@kordi.re.kr

접수일 12년 02월 02일

수정일 12년 02월 20일

게재확정일 12년 04월 12일

증가하는 장점을 갖고 있다. 따라서 신재생 청정 에너지 원 확보를 위하여 해상풍력단지 사업계획이 국가 또는 지자체를 중심으로 수립되어 추진되고 있다. 또한 해상풍력기, 단지설계, 건설기술 및 유지보수 기술 등과 같은 관련기술이 성숙단계에 이르러 경제성이 확보되면, 향후 해상풍력은 국가에너지정책의 주축이 될 것으로 전망된다.

해상풍력발전단지의 경제성을 확보하기 위해서 터빈 용량은 대형화되어가고, 풍력발전기의 설치수심은 깊어진다. 그러므로 해저지반조건에 적합하고 경제성이 우수한 기초형식을 선정하는 것은 전체구조물의 안정성뿐만 아니라 풍력발전기의 시공비에 큰 영향을 준다. [3]에 따르면 육상풍력단지의 건설비용 중 75%는 터빈비용이고, 기초구조물 비용은 불과 7% 정도라고 하였다. 그러나 해상풍력단지는 터빈비용이 45%까지 감소하는 반면, 하부구조 및 기초 비용이 25~35%까지 증가하게 된다[4].

수심이 대략 30m 미만에서는 중력식(concrete gravity base structure, GBS)이나 모노파일(monopile) 형식의 기초가 사용되고, 수심이 30m~50m일 경우에는 자켓(jacket), 석션버켓(suction bucket)이 적용된 모노포드(monopod)와 트라이포드(tripod)등 다양한 기초를 사용할 수 있다. 현재 개발이 추진되고 있는 해상풍력발전 후보지 대부분은 수심 20m 미만 지역이나, 향후에는 수심 20~50m 입지에 대한 개발이 진행될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 대수심 조건에 적용 가능한 기초형식 중에서 버켓기초가 적용된 트라이포드 형식의 기초와 자켓기초의 경제성을 비교하였다.

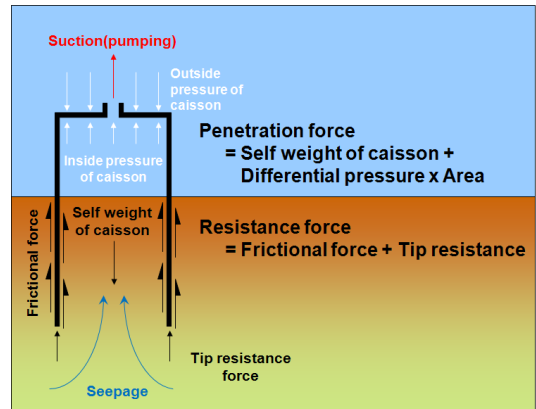
2. 석션버켓기초

버켓기초는 기초의 형태가 양동이(bucket)를 거꾸로 놓은 듯한 형상이라 하여 붙여진 이름이며, 석션버켓기초는 버켓 내부에 채워져 있는 해수를 수중펌프를 이용하여 밖으로 배출시킴으로써 생겨나는 내·외부의 압력 차에 의해 압입되는 방식으로 시공되는 기초를 일컫는다.

그림 1은 석션버켓기초의 관입원리를 도시한 것이다. 버켓기초를 해저면에 안착시키면 기초 자중에 의해 파일의 하단부가 연약한 지반에 일정 깊이까지 관입하게 된다. 자중에 의해 발생한 관입력과 기초의 하단에서 받는 선단지저력, 주면마찰력이 평형을 이루면 더 이상 자중관입이 되지 않는다. 이때 펌프를 이용하여 기초내부의 해수를 외부로 배출하면 이로 인해 버켓 내·외부에는 압력차가 발생하고, 이 압력차를 이용하여 기초는 관입된다.

기초의 내·외부의 압력차로 인한 힘의 불균형이 평형이 되기 위해서는 해수가 다시 기초내부로 유입되거나

석션버켓기초가 지반으로 관입되어야 한다. 그러나 비배수상태인 점토지반이나 다른 투수성이 낮은 해저지반인 경우 해수의 유입이 거의 불가능하므로, 버켓은 압력차와 면적을 곱한 만큼의 관입력을 받게 된다. 관입력은 기초의 단면적, 즉 직경의 제곱에 비례하지만 저항력은 기초의 둘레, 즉 직경과 비례하기 때문에 기초의 직경이 클수록 관입력은 증가한다[5].



[그림 1] 석션버켓기초의 관입 원리
[Fig. 1] Concept of suction bucket foundation

석션버켓기초는 관입을 위한 별도의 대형장비가 필요하지 않으므로 설치가 비교적 간단하고 시공속도가 빠르며 경제적인 기초공법으로 알려져 있다. 그리고 수심이 깊어지고 직경이 커질수록 발생하는 관입력이 증가하므로 석션버켓기초는 대수심 조건에서 적용에 유리하다. 또한 관입 시와 반대순서로 해수를 기초내부로 유입시키면 인발이 가능하므로, 사용완료 후 제거가 가능하다는 장점이 있다[5]. 따라서 석션버켓기초는 파고가 큰 곳, 설계진도가 큰 곳, 현지에서 급속시공이 요구되는 경우, 대수심 시공의 경우, 표층이 연약지반이고 비교적 얇은 심도에 지지지반이 있는 경우 등의 조건에서 타 기초형식보다 유리하다.

3. 석션버켓기초 적용사례

3.1 국내사례

국내에서의 석션버켓기초에 대한 연구는 해상 구조물을 대상으로 꾸준히 진행되어 왔다. 1999년 대우건설 기술연구소에서는 원심모형시험으로 석션기초의 거동을 연구하여 석션기초의 범용 설계기법과 석션기초의 적용범위를 심해저 점토지반에서 천해 모래층까지 확대하였다[6].

한국해양연구원에서는 연약지반용 부유식 방파제 개발을 위한 연구과정에서 방파제의 지지구조물로서 석션 기초를 적용하였다[7]. 그림 2는 울산신항 북방파제에서 케이슨 방파제의 지지구조물로서 이용한 석션기초를 보여준다.

이 외에도 석션기초는 부산과 거제대교를 연결하는 침매터널의 임시계류에 사용된 사례가 있으며, 또한 석션파일을 활용한 ESA(embedded suction anchor)가 원전항에 부유식 방파제의 앵커로 적용된 사례가 있다. 해상풍력발전타워의 기초로 적용된 사례는 아직 없으나, 현재 연구가 진행중이다[2].



[그림 2] 울산신항 북방파제에 적용된 석션기초
[Fig. 2] Suction foundation of north breakwater at Ulsan new port

3.2 국외적용사례

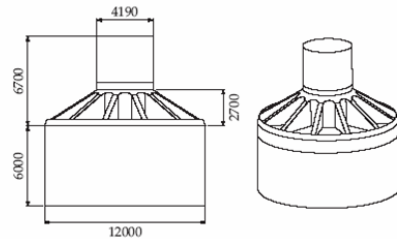
석션버켓기초는 1960년에 고베항의 제5방파제에 PC관식 셀룰라 블록을 사용한 시공사례가 있고 최근 유럽에서는 북해의 석유굴착 리그(rig)의 기초로 활용된 사례가 있다. 이들 사례에 따르면 석션버켓기초의 설치수심은 11m에서 350m까지에 이르므로 석션버켓기초를 적용할 수 있는 수심의 범위는 매우 넓다. 적용토질은 점성토가 많으나, 이 밖에 점토와 모래의 혼합층이나 사질토의 경우도 있다. 그리고 기초형상은 원통형이 많고 기초의 근입깊이는 4m~36m이며, 근입비는 대부분 1.0 이하로 얇은기초에 해당된다.

덴마크의 Frederikshavn 해상풍력단지의 터빈 1기가 석션버켓기초로 설치되었다. 이 해상풍력단지는 덴마크 북부 Frederikshavn 항에 인접하며 2~3MW 규모의 터빈 4기로 구성된 해상풍력 테스트베드이다. 그림 3에 버켓기초의 형상과 규격을 나타내었다. 버켓기초의 지름은 12m, 길이는 6m이고, 총 중량은 약 135ton인데, 이는 동일 위치에서 설계된 monopile보다 약 100ton 감소된 중량이다. 그림 3(b)에서 현장에 설치중인 석션버켓기초를 볼

수 있으며, 이 기초는 관입시간 6시간을 포함하여 총 12시간에 걸쳐 시공되었다. 그리고 기초시공후 3MW Vestas V90터빈이 설치되어 2002년도에 완공되었다[8].

독일은 Wilhelmshaven 해상풍력단지에 5MW급 터빈의 기초구조물로서 지름 16m, 길이 15m의 석션버켓기초를 설치할 계획이었으나, 설치 중 바지선이 측면으로 이동하면서 버켓과 충돌하면서 버켓에 좌굴이 발생하는 사고에 의해 시공이 중단된 바 있다.

Aalborg 대학, MBD Offshore Power 그리고 Dong Energy는 프로토타입 석션버켓기초를 2009년 3월 Horns Rev II에 설치하여 기상관측에 활용하고 있다. 이 석션버켓기초는 직경 12m, 길이 6m, 무게는 165ton이며, 수심 15m에 수직각을 0.1도 이내로 유지하면서 설치되었다.



(a)



(b)

[그림 3] Frederikshavn에 설치된 버켓기초. (a) 형상, (b) 시공전경[8]

[Fig. 3] Bucket foundation installed at Frederikshavn. (a)Shape, (b)Construction[8]

4. 석션버켓기초의 경제성

4.1 설계조건

본 연구의 목적은 50m의 수심에서 해상풍력발전구조물의 기초형식에 따라 필요한 개략적인 사업비를 검토하는 것이다. 검토에 사용한 기초형식은 두 종류인데, 첫 번째는 그동안 대수심에서 적용되어온 일반적인 자켓형식이고, 두 번째는 최근 국·내외에서 관심을 받고 있는 석

선버켓기초를 적용한 트라이포드형식이다. 여기서, 모노포드형식은 대수심 조건에서 안정성 확보에 어려움이 있으므로 검토에서 제외하였다.

지반조건은 상부지반이 사질층일 때와 연약층일 때로 구분하였다. 사질층과 연약층에 대한 지반조건은 서해안 위도지역과 남해안 통영지역의 지반조사결과를 토대로 근사적으로 단순화시킨 후 사용하였고, 그 값들은 표 1과 2에 정리하였다.

구조물에 작용하는 터빈의 하중조건은 터빈용량 및 제조업체에 따라 다르다. 이에 본 연구에서는 스웨덴 남부의 해상풍력단지인 Kriegers Flak II 설계에 사용된 5MW급 터빈의 하중조건을 참고하였으며 표 3에 정리하였다 [9].

[표 1] 상부 사질층 조건

[Table 1] Soil properties of sand condition

지 층	심도(m)	N치	단위중량(KN/m ³)
모 래	30.0	40	19.0
실트질 점토	15.0	35	18.4
세립질 모래	9.5	50/20	19.0
풍 화 토	7.5	50/12	19.5
풍 화 암	3.0	50/8	21.0
연 암	65.0m 이하	-	-

[표 2] 상부 연약층 조건

[Table 2] Soil properties of clay condition

지 층	심도(m)	N치	단위중량(KN/m ³)
실트질 점토	7.0	2	13.5
점토질 자갈	2.0	18	19.0
풍 화 토	7.0	50/24	19.5
풍 화 암	2.0	50/10	20.0
연 암	18.0m 이하	-	-

[표 3] 기초에 작용하는 최대하중[9]

[Table 3] Maximum load at foundation

구분	수직력(MN)	수평력(MN)	모멘트(MN.m)
5MW	7.1	3.0	90.0

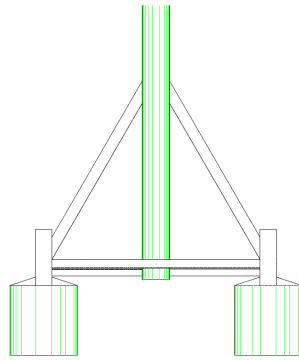
4.2 기초설계

수심 50m 조건에서는 모노포드 형식의 하부구조가 적용되기 어렵기 때문에 트라이포드 형식의 하부구조에 버켓기초를 적용하는 것으로 설계하였다. 트라이포드 버켓기초형식은 폭-길이비가 1에 가깝기 때문에 얇은기초로 분류할 수 있으므로, 트라이포드 버켓기초형식의 안정성

검토를 얇은기초에 대해 검토하는 방법에 따라 수행하였다.

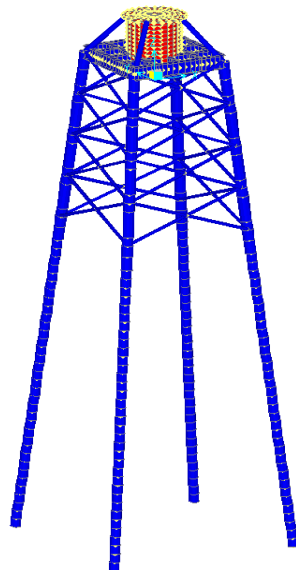
자켓형식은 단면결정 후, 부재의 응력검토 방법은 자켓 구조물의 특성을 고려할 수 있어 일반적으로 사용되고 있는 API RP 2A-WSD code를 이용하였다. 이 방법에 따라 각 부재의 축방향인장응력과 압축응력, 휨인장응력, 전단응력을 검토하였으며, 모든 부재의 최대응력비가 허용응력비인 0.95이하인 것을 확인하여 단면을 확정하였다.

그림 4와 5는 설계를 위한 트라이포드형 버켓기초와 자켓기초 기본형상을 나타낸 것이다.



[그림 4] 트라이포드 버켓기초 설계 기본 형상

[Fig. 4] Basic shape of tripod with bucket foundation



[그림 5] 자켓기초 설계 기본형상

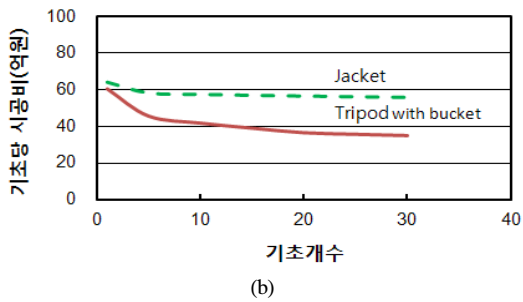
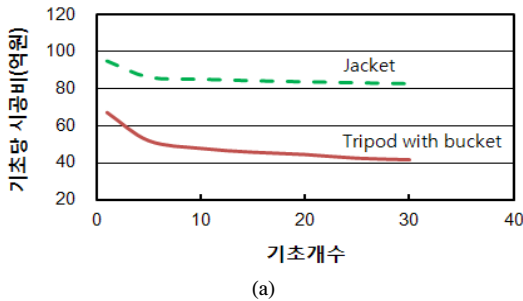
[Fig. 5] Basic shape of jacket foundation

4.3 경제성 분석

본 연구에서 도출된 각 기초의 시공비는 제작 및 설치

비용과 부대공사, 제경비 등을 모두 고려하여 개략적으로 산출된 것이다.

그림 6에서 기초 1기당 시공비와 기초개수의 관계를 볼 수 있다. 기초형식(자켓과 트라이포드 버켓기초)에 관계없이 시공비는 기초개수가 증가함에 따라 감소하며 기초개수가 20개 이상일 때 일정한 값에 수렴하는 경향을 보인다. 그러나 상부지반이 사질지반, 연약지반 모두에서 트라이포드 버켓기초의 기초당 시공비는 자켓의 경우보다 적은 것으로 나타났다.



[그림 6] 상부 지반조건에 따른 기초당 시공비. (a) 사질층, (b) 연약층
 [Fig. 6] Construction cost per one foundation. (a) Sand, (b) Clay

그림 7은 그림 6의 기초형식(자켓과 트라이포드 버켓 기초)에 따른 기초당 시공비를 기초개수가 1기와 20기일 때를 비교하여 나타낸 것이다. 상부지반이 연약층일 때 기초 1기 시공비는 자켓의 경우 64.2억원, 트라이포드 버켓기초의 경우 60.5억원이므로, 연약층에서는 기초형식에 관계없이 기초 1기 시공비는 크게 차이나지 않는다.

그러나 상부지반이 사질층일 때 자켓 1기 시공비는 95.0억원으로 연약층에서 자켓 1기를 시공할 때의 1.5배이고, 사질층에서 자켓 20기의 기초당 시공비는 84.6억원으로 연약층(57.2억원)에서의 약 1.5배이다.

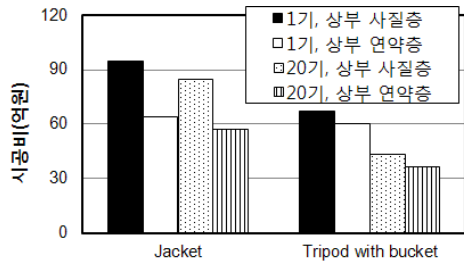
반면 사질지반에서 트라이포드 버켓기초 1기 시공비는 67.1억원이므로 연약지반에서 트라이포드 버켓기초 1기를 시공할 때의 1.1배이다. 그리고 사질지반에서 트라

이포드 버켓기초 20기의 기초당 시공비는 43억원으로 연약층(36.4억원)에서의 1.2배에 불과하다.

즉, 사질지반에서 기초의 시공비는 기초형식에 따라 크게 차이가 나며, 그 차이는 기초개수의 증가에 따라 더 커지게 된다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 석션버켓 기초는 적용할 수 있는 지반이 광범위하고, 표층이 연약 지반이고 비교적 얇은 심도에 지지지반이 있는 조건에서는 타 기초형식보다 유리하다는 장점 때문이다. 또한 석션버켓기초는 관입을 위한 별도의 대형장비가 필요하지 않으므로 설치가 비교적 간단하기 때문이다.

자켓 기초형식은 사질층 또는 연약층 지반조건에서 기초개수가 1기에서 20기로 증가하더라도 기초당 시공비는 크게 감소하지 않는다. 그러나 트라이포드 버켓기초형식은 기초개수가 1기에서 20기로 증가하면 기초당 시공비가 눈에 띄게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 버켓기초형식은 설치가 간단하여 시공속도가 빠르므로 자켓 기초형식보다 경제적인 기초공법이라는 것을 알 수 있다. 즉 석션버켓기초의 경제성은 기초 자체의 제작비 절약이 아닌 간편한 시공법에 의한 것이라 할 수 있다.

표 4는 각 지반조건에서 자켓 시공비에 대한 트라이포드 버켓기초의 시공비를 백분율로 정리한 것이다. 상부지반조건에 관계없이 트라이포드 버켓기초는 자켓보다 시공비가 저렴하고 기초개수가 증가함에 따라 시공비는 더욱 저렴해지는 것을 확인할 수 있다.

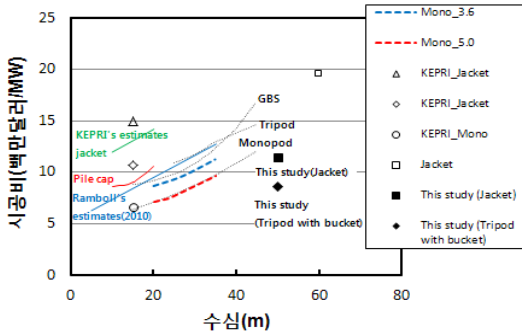


[그림 7] 기초형식, 지반조건과 설치개수에 따른 시공비의 비교
 [Fig. 7] Comparison on construction cost with foundation type, subsurface condition

[표 4] 자켓 시공비에 대한 트라이포드 버켓기초 시공비 비율
 [Table 4] Construction cost of tripod bucket foundation to the jacket foundation

상부 지반조건	기초개수			
	1	10	20	30
사질층	71%	56%	53%	50%
연약층	94%	73%	65%	63%

그림 8은 본 연구에서 검토한 해상풍력발전구조물의 기초형식에 따른 시공비용을 기존문헌에 제시된 시공비용과 비교한 것이다[10]. 그림에서 석션버켓기초를 이용한 모노포드 또는 트라이포드는 자켓보다 저렴한 것을 확인할 수 있다.



[그림 8] 다른 연구결과에 의한 시공비와 비교
[Fig. 8] Comparison with literature

5. 결론

본 연구에서는 대수심 조건에 적용 가능한 기초형식인 자켓기초와 석션버켓기초가 적용된 트라이포드를 두 종류의 지반에 설치할 때의 개략 시공비용을 산출하여 비교하였다. 기초개수가 증가함에 따라 자켓과 트라이포드 버켓기초의 1기당 시공비는 감소하며 20기 이상이면 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 상부지반이 연약지반인 경우 자켓과 트라이포드 버켓기초의 1기 시공비용은 크게 차이가 나지 않으나, 사질지반인 경우 트라이포드 버켓기초 1기 시공비용은 자켓보다 약 30% 저렴하였다. 또한 20기를 시공할 때 트라이포드 버켓기초의 시공비용은 자켓보다 50%까지 절감될 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서의 가정된 설계 조건에 대한 개략 경제성 검토 결과에 의하면 트라이포드 버켓기초형식은 자켓기초형식보다 상대적으로 경제성이 높은 것으로 나타났다. 다만, 실제 사업수행시에는 대상 현장의 여건과 상세설계를 토대로 경제성을 검토할 필요가 있다.

References

[1] G. S. Kang, "Overview on Development Trend of Offshore Wind and Role of Civil Engineers" Water for Future, Korea Water Resources Association, Vol. 42,

No. 5, pp. 75-81, 2009.

[2] M. H. Oh et al. "Overview on Suction Bucket Foundation Technology for Offshore Wind Turbines" Korea Geotechnical Society Fall National Conference, pp. 88-95, 2011.

[3] EWEA, The Economics of Wind Energy, The European and Energy Association, 2008.

[4] EWEA, Oceans of Opportunity: Harnessing Europe's Largest Domestic Energy Resource, The European and Energy Association, 2009.

[5] S. Bang et al. "Investigation on Suction Pile Retrieval." Int. Conf. on Foundations, Dundee, Scotland, Sep., 2003.

[6] S. Bang et al. "Calibration of Analytical Solution Using Centrifuge Model Tests on Mooring Lines." 13th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. & Exhibition, Hawaii, USA, May, ISOPE 2003-JSC-122, 2003.

[7] Ministry of Land Transport and Maritime, Technologies for Breakwaters in Deep Water and Soft Ground Improvement, Korea Ocean Research & Development Institute, 2009.

[8] L. B. Ibsen et al. "Design of New Foundation for Offshore Wind Turbines." Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC), Detroit, Michigan., 2004.

[9] L. B. J. Ljjj et al. Design Basis Foundations- Basic Data for Conceptual Design of Foundations, Vattenfall Vindkraft AB, 2008.

[10] G. S. Kang et al. "Economic Analysis on Offshore Wind Demonstration Farm", Korea Wind Energy Association 2011 Spring Annual Conference, 2011.

오 명 학(Myounghak Oh)

[정회원]



- 1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국해양연구원 선임연구원

<관심분야>

지반환경공학, 해양에너지

권 오 순(Osoon Kwon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 2002년 4월 : 한국해양연구원 선임연구원
- 2002년 5월 ~ 현재 : 한국해양연구원 책임연구원

<관심분야>

해양지반조사, 해양구조물기초

김 근 수(Keun Soo Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 인하대학교 토목공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 인하대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 인하대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 한국해양연구원 박사후연구원

<관심분야>

지반공학, 해상풍력기초, 보강토공법

장 인 성(Insung Jang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2002년 12월 : 한국해양연구원 연수연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양연구원 재직

<관심분야>

지반공학, 지반조사, 해양구조물, 수중시공장비