

## 해상풍력발전설비를 위한 버켓기초의 기술동향 및 기술개발 방향 Trend in suction bucket foundation for offshore wind turbine

윤희정<sup>1)</sup>, Heejung Youn, 장인성<sup>2)</sup>, Insung Jang, 오명학<sup>3)</sup>, Myounghak Oh, 권오순<sup>2)</sup>, Osoon Kwon, 정성준, <sup>4)</sup>Sungjun Jung

<sup>1)</sup> 홍익대학교 토목공학과 전임강사, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul

<sup>2)</sup> 한국해양연구원 책임연구원, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI

<sup>3)</sup> 한국해양연구원 선임연구원, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI

<sup>4)</sup> 한국해양연구원 연수연구원, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, KORDI

**SYNOPSIS** : This paper reviews research trend in suction bucket foundation. Wind energy farm has been considered as an efficient alternative to fuel energy as world markets attempt to discover renewable resources. Recently, Korean government initiated the research projects investigating installation method of offshore wind energy foundation and design guideline as well as verifying feasibility of offshore wind farm. In fact, the installation of monopile and gravity type foundation has been successfully carried out in European and other advanced countries, and design guideline of those foundations are well established; however, various types of foundation would be necessary in the near future as offshore wind farm demands abundant wind resources in deep sea. In this paper, bucket foundation is spot lighted as a powerful and economic alternative applicable to deep sea condition.

**Keywords** : suction bucket foundation, suction, bucket, offshore wind energy,

### 1. 서 론

해상 풍력발전은 육상 풍력발전에 비하여 기술적·경제적 고려사항이 많지만, 해상이 육상보다 풍력자원이 풍부하고 풍력감소가 상대적으로 작기 때문에 전기출력량이 증가하므로 신재생 청정 에너지원 확보를 위하여 해상풍력발전에 대한 관심이 고조되고 있다. 해상풍력발전이 경제성을 확보하기 위해서는 대규모 단지로 조성되어야 하며, 기초의 시공비용을 절감할 수 있는 경제적인 기초시스템이 개발되어야 한다. 유럽에서는 모노파일과 중력식 기초를 사용한 해상풍력기초가 주로 설치되었고 그에 따른 설계기준은 잘 정비되어 있으나, 해상풍력단지의 입지가 풍력자원이 풍부한 깊은 수심으로 옮겨가고 있어 미래의 기술적인 요구는 현재보다 다양한 형태의 풍력기초로 옮겨갈 것이다. 일반적으로 버켓기초는 20m 이상의 수심조건에서 경제성이 높은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 풍력기초분야에서 20m 이상의 대수심 조건에서 적용될 수 있는 풍력발전의 기초시스템은 버켓파일, 버켓트라이포드 기초가 경제적으로 적용 가능하다. 버켓기초가 해상풍력발전의 기초로 적용되기 위해서는 우선적으로 수직도가 확보될 수 있는 시공 기술의 개발이 수행되어야 할 것이다.

해외의 경우 대수심에 설치되는 해상 석유시추 구조물시공 시 석션기초가 수십년 전부터 사용되어 왔으나, 최근에는 대수심(50m이상)에 해상풍력단지 시공을 위한 대안으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 현 기술수준에서 사용하고 있는 해상풍력기초로는 단말뚝이나 중력식 풍력기초가 있으나, 수심이 깊어짐에 따라 부대장비의 규모가 커져야 되고 운반과 설치시 운용의 어려움, 그리고 많은 시간이 소요되어 설치 비용이 기하급수적으로 늘어나는 단점이 예상된다. 반면, 석션버켓기초의 경우에는 충분한 용량의 펌프만 있으면 더 가벼운 장비들로도 설치가 가능하다는 장점이 있어 대수심에서 설치비용을 절감할 수 있는 것으로 여겨지고 있다. 석션버켓기초의 경제성은 기초 자체의 제작비 절약으로부터 오는 것이 아닌 간편한 시공성으로부터 온다는 점을 강조하고 싶다.

석션버켓기초는 버켓 내부에 채워져 있는 해수를 수중펌프를 이용하여 버켓 밖으로 배출시킴으로써 생겨나는 내부와 외부의 수압 차에 의해 기초가 연직방향으로 힘을 받게 되어 압입하는 방식을 지닌 기초를 일컫는다. 따라서 버켓의 단면적이 커지거나 수심이 깊어질수록 석션압이 작용하는 면적과 수압의 상승에 의해 관입력이 커지는 것이 중요한 특징 중 하나이다. 비슷한 원리와 형태를 지닌 기초가 각기 다른 이름으로 불리기도 하는데, 그 형태가 양동이(bucket)을 거꾸로 놓은 듯 한 형상을 지녔다 하여 버켓기초라고 불리기도 하며, 기초에 치마(skirt)형태로 돌렸다 하여 스킨티드기초 (skirted foundation), 석션압을 사용한다 하여 석션기초라고 불리기도 한다. 정확한 합의된 구분은 없으나 용어의 편의성을 위하여 버켓기초의 경우에는 석션압을 이용하기 보다는 자중에 의한 관입력이 주요한 경우를, 석션기초의 경우 석션압을 이용한 관입이 주를 이루는 경우, 그리고 스킨티드 기초는 버켓기초나 석션기초가 둥근 형태인데 반해 사각형의 모형이나 다른 형태의 단면을 갖는 경우로 더 넓은 범위를 일컫는다고 알려져 있다. 본 논문에서는 석션압을 이용한 버켓형태의 기초이므로 석션버켓기초로 통칭하도록 한다.

## 2. 석션버켓기초의 메케니즘

석션버켓기초는 관입력이 단면적과 관계가 있기 때문에 직경이 기초길이에 비해서 상대적으로 큰 구조를 지니고 있고, 보통 길이와 직경비는 2:1을 넘지 않으며 현실적인 최대 직경비는 10이내인 것으로 알려져 있다. 현재까지 시공된 석션기초 중 가장 큰 직경은 32m, 길이는 37m에 이르고, 수심 300m 해저 지반에서 석유시추를 위한 해상구조물 지지에 사용되었다 (Tjelta et al., 1990)

그림 1 a)는 석션버켓기초의 관입 메케니즘을 도식한 그림이다. 석션버켓기초는 해저면에 안착시킨 후 기초 자중에 의해 파일의 하단부가 연약한 지반에 일정 깊이까지 관입을 하게 된다. 자중에 의해 발생한 관입력과 기초의 하단에서 받는 선단지지력, 주면마찰력, 그리고 자중이 평형을 이루게 되면 펌프를 이용하여 기초내부의 해수를 외부로 배출하여 그로 인해 발생한 압력차를 이용하여 관입하게 된다. 기초의 내/외부의 압력차를 극복하기 위해서는 해수가 다시 기초내부로 유입이 되거나 석션버켓기초가 관입 지반으로 관입하게 되는데, 비배수상태인 점토지반이나 다른 투수성이 낮은 해저지반인 경우 해수의 유입이 거의 불가능하고 따라서 압력차이와 면적의 곱만큼의 관입력이 생성하게 된다. 관입력은 기초의 단면적 즉 직경의 제곱에 비례하지만 저항력은 기초의 둘레, 즉 직경과 비례하기 때문에 기초의 직경이 클수록 관입력은 커지게 된다. 석션버켓기초의 다른 주요한 특징은 관입 시와 반대순서로 해수를 기초내부로 유입시킴으로써 설치만큼이나 인발도 용이하다는 점이다 (Bang and Cho, 2003).

석션버켓기초의 확실한 관입을 위해서 두 가지 요소를 고려해야 한다: 1) 기초의 내/외부 압력차가 작은 경우 관입력이 지반의 지지력보다 작게 되어 기초관입이 불가능하게 되므로 충분한 용량의 펌프를 준비해야 한다, 2) 투수성이 높은 모래층에서 펌프 미세한 조절을 실패한 경우 압력차가 너무 급격하게 커진 경우에는 해수가 모래층을 통과하여 기초 내부로 흐르는 sand boiling 현상이 발생하게 되며, 투수성이 작고 연약한 점토지반의 경우에도 기초 내부에 점토가 빨려들어 오는 plugging 현상이 발생하여 관입이 불가능할 수 있다. 따라서 압력차가 너무 크지도 않고 작지도 않은 수준의 압력차가 발생하도록

설계하도록 하는 것이 중요하다 (한국해양연구원, 2009). 그림 1 b)는 석션 설계압으로 석션압이 지반을 땅가뜨리지 않는 수준의 upper bound나 관입력이 지지력보다 작아지는 lower bound 사이에 있어야 된다는 것을 보여주고 있다.

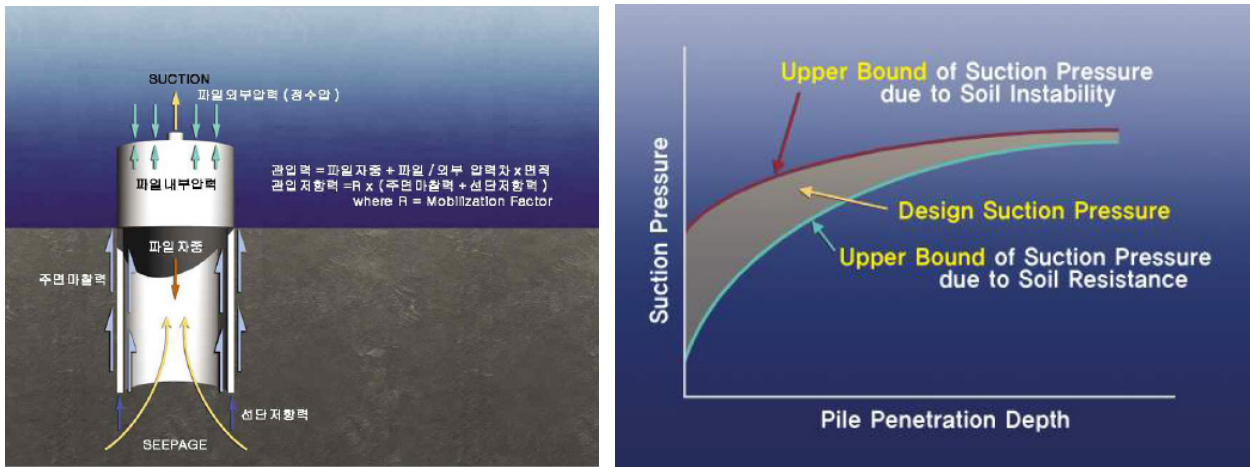


그림 1. a) 석션버켓기초 설치 원리, b) 안전한 관입을 위한 설계 석션압 (한국해양연구원, 2009)

### 3. 국내동향

풍력단지가 해상에 시공된 적이 없는 국내실정을 보았을때 해상풍력기초로써의 석션버켓기초는 연구가 전무하다고 볼 수 있으나, 석션버켓기초에 대한 연구는 해상 구조물을 대상으로 꾸준히 진행되어 왔다. 1999년 대우건설 기술연구소에서 미해군의 석션기초 연구과제의 일부로 원심모형시험을 실시한 바 있으며, 연구의 결과로 석션기초의 범용 설계기법을 제시하였고, 석션기초의 적용범위를 심해저 점토지반에서 천해저 모래층과 육상으로 넓힐 수 있는 근거를 마련한 바 있다 (Bang, Cho, and Kim, 2003; Bang and cho, 2001).

또한 연약지반용 부유식 방파제 개발을 위한 연구과정에서 방파제의 지지구조물로써 석션기초를 사용하기 위한 연구가 한국해양연구원에서 면밀히 이루어졌다. 모형 석션기초를 제작하여 석션기초의 횡방향 지지력을 해석 및 평가하여 수평지지력이 기초 단면과 관입깊이 그리고 기초의 휨강성의 영향을 받는 것을 밝힌 바 있다. 또한 석션기초의 수리 지반 모형 실험과 수치해석을 통하여 외력에 대한 안전성을 평가했다 (한국해양연구원, 2009). 실내 모형실험을 위해 순수 모래층과 점토 (카올리나이트)와 모래(주 문진 표준사)로 이루어진 이층 지반을 모형토조에 조성하였고, 실험 모형석션버켓은 직경 10cm의 원통 모양으로 관입깊이 8 - 20cm 이내로 아크릴로 만들어졌다. 그림 2 에 지반에 관입하는 모형석션버켓(a) 과 횡방향 지지력 평가 실험에 사용된 실험 세팅(b)을 보여주고 있다. 실험 결과로 석션버켓의 길이에 따른 횡방향지지력을 평가하고, 지반조건에 따라 하중-변위 곡선을 구하여 석션버켓의 횡방향 지지거동에 대해서 연구하였다. 또한 석션버켓기초의 안정성 검토를 확인하기 위해 1/50 스케일로 축소하여 상사비를 맞춘 석션버켓을 제작하고 방파제 모형을 설치한 후에 여러 가지 규칙 및 불규칙 파를 생성하여 모형방파제의 거동 결과를 획득 분석하였다 (그림 3).

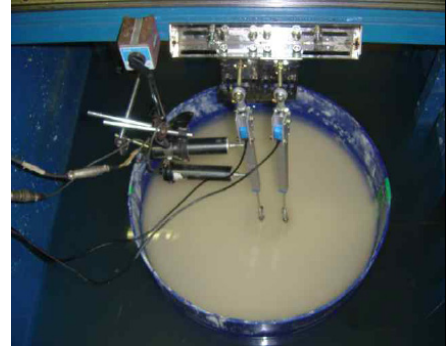


그림 2. a) 자중에 의한 모형 석션버킷관입 b) 모형실험에 사용된 계측장치들

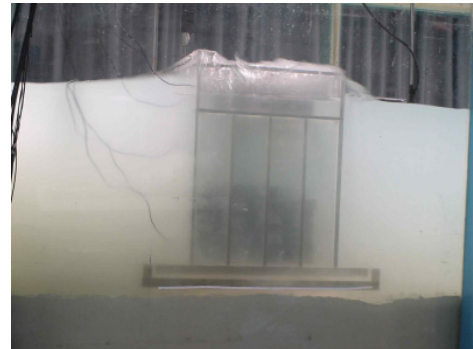
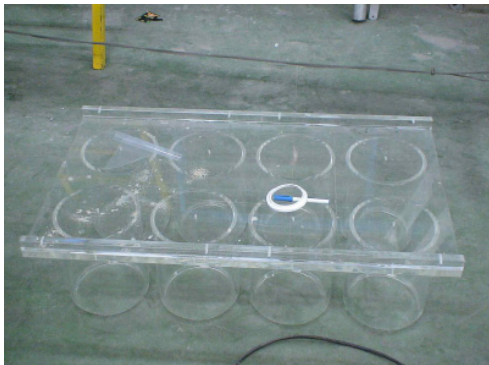


그림 3. a) 실내 모형실험용 석션버킷기초 b) 조파에 의한 방파제와 석션버킷기초의 거동실험

실내시험과 더불어 시험결과를 바탕으로 울산신항 북방파제에서 석션기초를 이용한 부유식 방파제를 성공적으로 시험 시공한 바 있으며 당시 시공한 석션기초 방파제의 개념도와의 개념도는 그림 4 a) 그리고 콘크리트로 제작한 석션기초는 그림 4 b)에 보여지고 있다. 시험시공을 위해 실시설계단계에서 외력에 대한 석션기초의 안정성 검토를 실시하였으며, 석션기초의 지지력은 “항만 및 어항설계기준”에서 제공하는 방법에 의한 편심 및 경사하중에 대한 검토와 “도로공사표준시방서”에서 추천하는 방법을 이용한 안전성 검토를 평상시, 지진시, 파압시로 나누어 활동과 전도, 그리고 압밀 침하에 관해 안전성 검토를 하였다. 전체적인 안정성 검토는 얕은기초의 설계시 사용하는 과정과 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

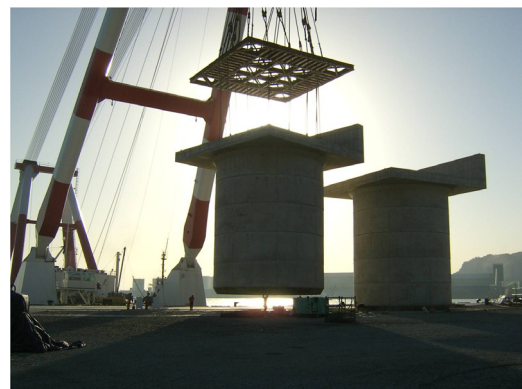
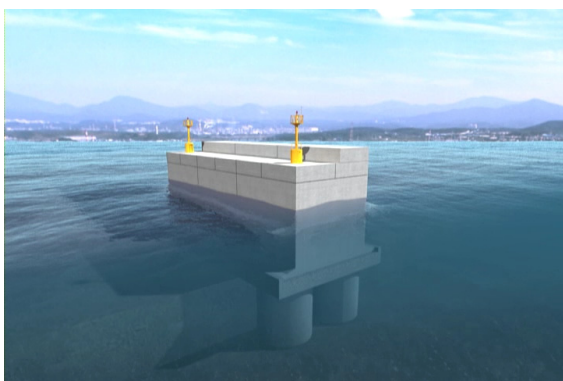


그림 4. a) 울산신항에 설치한 석션기초 방파제 개념도 b) 석션기초 완성품 운반

## 4. 해외동향

해상풍력단지 조성용 석션버켓기초에 대한 연구는 해상풍력단지가 유럽의 곳곳에 본격적으로 조성되기 시작한 2000년대에 들어 Oxford 대학교, Aalborg 대학교등을 중심으로 집중적으로 이루어졌다. 3년간 약 150만 유로를 투입하여 해상풍력기초 석션버켓기초에 대한 설계지침 작성을 위해 연구가 진행되어 2005년에 완료되었다 (Byrne and Houlsby, 2006). 전체적인 연구범위는 1) 관련 지역 지반조사 (Fugro), 2) 풍속, 조류, 터빈하중을 정하기 위한 모형실험 (Garrad Hassan and HR Wallingford), 3) 구조물 결정을 위한 사전조사 (SLP Engineering), 4) 실내실험을 이용한 기초 거동연구, 5) 내륙 현장실험을 이용한 스케일링 관계식 추정, 6) 실내실험과 현장실험을 이용하여 반복하중을 묘사할 수 있는 "force resultant" 모델 개발, 7) 완벽한 해석을 위한 "Force resultant" 모델과 Garrad Hassan 프로그램 "Bladed" 연계, 8) 지반별 가능한 석션버켓기초의 구성과 구조물 연구, 9) 스카우어와 액상화 현상 실험 연구, 10) 제안된 설계를 시공하기 위한 방법론, 장비, 그리고 세부계획 등이었다.

여러 조합의 하중에 대한 석션버켓기초의 거동은 옥스퍼드 대학교의 실험실에서 연구되어진 바 있다. 점토층은 물론 조밀하고 느슨한 모래층에서 정하중과 동하중, 그리고 피로하중, 그리고 시공의 영향에 대해서 연구를 수행하였으며, 실험결과를 통해서 "force resultant" 소성모델을 개발하는데 사용하였다. 또한 단말뚝 석션버켓기초의 얇은 수심에서의 모멘트하중에 대한 거동을 분석하는데도 사용됐다. 연구 결과 단말뚝 석션버켓과 트라이포드 석션버켓의 경우 하중에 대해 다른 거동을 보이는 것이 밝혀졌다. 특히, 바람과 파도로부터 발생하는 모멘트 하중에 대해 단말뚝 석션버켓의 경우 직접적으로 저항하게 되어 모멘트에 대한 석션버켓기초의 거동을 조사하여 석션버켓을 길이와 직경 설계할 수 있다. 반면, 트라이포드 형태의 석션버켓은 하중의 방향에 따라 압축력과 인발력이 동시 다발적으로 작용한다. 즉 방향에 따라 한 석션버켓이 압축력을 받으면 반대편 석션버켓은 인발력을 받을 수 있다. 따라서 석션버켓들이 연직방향의 반복하중을 겪게 되어 이에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 특히 모멘트의 힘이 구조물의 자중보다 더 커질 경우에는 석션버켓중에 인발력을 받게 되는 경우에 주의를 요한다 (Byrne and Houlsby, 2006).

### 실내실험

실내실험은 수직, 수평 그리고 모멘트하중에 대한 석션버켓기초의 거동을 밝혀내기 위해 Oxford 대학교, Western Australia 대학교, 그리고 Aalborg 대학교 등 여러 기관에서 수행되었다. 사용된 기초의 크기는 직경 0.1m에서 0.4m사이이다 (Houlsby et al., 2005c). 3개의 대학교에서 수행한 실내 모형실험의 석션버켓기초의 크기는 표 1에 정리되어 있다. 실내실험에서 적용한 하중은 보통 실험 여건상 한평면 하중(in-plane loads)으로 모멘트방향과 수평하중의 방향이 같은 방향이다. Aalborg 대학교는 CPT를 활용하여 모래의 조밀도와 강도를 측정된 후 포화시킨 모래에 석션버켓을 연직하중을 이용하여 설치한 후, 연직하중을 일정하게 유지하면서 수평하중을 적용하였다. 수평방향과 모멘트하중은 수평하중 작용점을 0.1m에서 4.0m까지 변화시켜서 기초의 변위와 모멘트를 측정하였다 (그림 5 a)). Oxford 대학교는 3방향 자유도를 지닌 실내실험장비를 제작하여 (그림 5 b)) 수직, 수평, 그리고 모멘트 하중의 재하가 변위 혹은 하중 조절을 통해 가능하도록 했다. 보통 모멘트 하중 실험은 연직하중은 고정시킨 후 회전변위를 점점 증가시켜가며 모멘트 하중을 측정하였으며 그 실험결과는 그림 6 a)처럼 표시된다. 하중이 반복적으로 재하될 수록 석션버켓의 강성이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 실험결과들로부터 일정한 연직하중에 대한 항복 모멘트 하중을 구해서 도식해보면 그림 6 b)와 같은 항복선을 구할 수 있다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 매우 작은 연직하중만 존재해도 상당량의 모멘트 하중을 지지할 수 있으며 연직방향 하중이 반대방향(인발)인 경우에도 지지할 수 있는 것으로 나타났다.

단말뚝 석션버켓기초와 더불어 테트라포드에 석션버켓을 이용하는 방안에 대해서도 검토된 바 있으며, 이 경우에는 석션버켓의 거동은 인발력에 의해 영향을 크게 받는다. 압축력과 인발력을 반복적으로 받

계 되기 때문에 석션버켓기초의 연직방향 반복하중에 대한 거동을 연구된 바 있다.

표 1. 모멘트 하중에 대한 석션버켓의 거동 실내 모형실험 (Houlsby et al., 2005c)

지명	지반	직경 D (m)	길이 L (m)
Oxford 대학교	모래층	0.1	0.0-0.066
		0.15	0.05
		0.15	0.1
		0.2	0.1
		0.2	0.2
		0.3	0.15
Oxford 대학교	점토층	0.2	0.1
		0.3	0.15
Aalborg 대학교	모래층	0.2	0.0-0.2
		0.3	0.0-0.3
		0.4	0.0-0.4
UWA 센트리퓨지	점토층	0.06	0.02
			0.03
			0.06

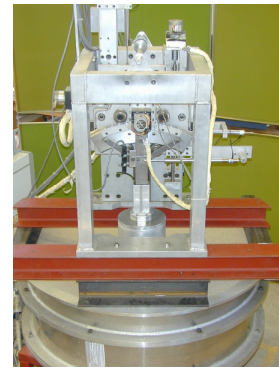
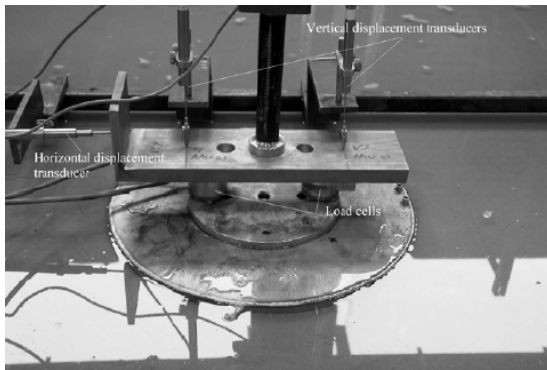


그림 5. a) 타워와 석션버켓사이의 계측 센서들, b) 3방향 자유도 실험 장치 (Houlsby et al., 2005c)

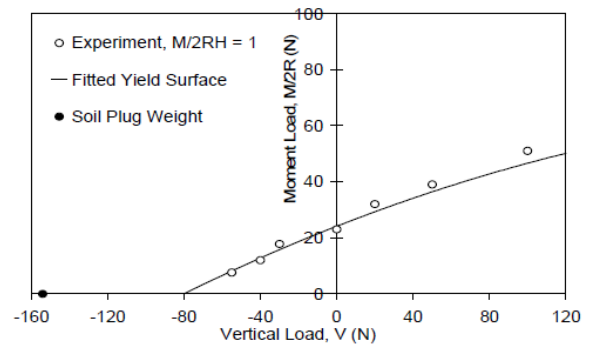
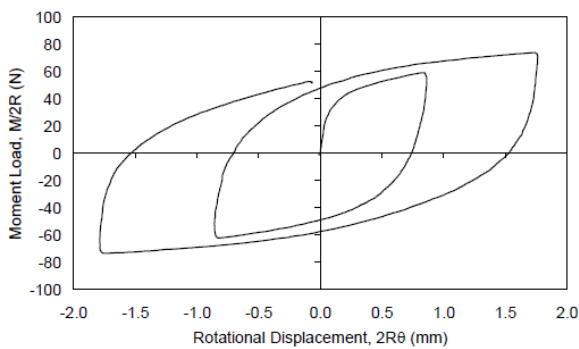


그림 6. a) 모래에서의 모멘트 하중 실험, b) 실험결과로부터 얻은 연직하중과 모멘트하중의 항복선 (Houlsby et al., 2005c)

## 현장실험

대수심에서의 현장실험은 여러 어려운 환경적인 제약조건들을 수반하기 때문에 현장실험은 연구대상에 비해 얕은 수심에서 이루어졌다. 보통 얕은 수심에서는 석션버켓의 관입력이 약해서 시공이 어려울 것이라는 것이 보편적인 생각이나, 펌프의 용량에 따라 충분한 관입력을 낼 수가 있고 견고한 점토층을 제외한 대부분의 조건에서는 관입이 가능하다. 표 2는 얕은 수심에서 설치해 현장실험에 사용된 석션버켓기초에 대한 세부사항을 정리한 것이다. 대구경 석션버켓기초가 해상풍력발전을 위해 설치한 것은 덴마크의 Frederikshavn에 설치한 것이 기초의 모양과 현장, 그리고 설치 과정은 그림 7에 보여지고 있다. 설치된 기초의 경우 직경 12m, 높이 6m로 4m 수심에서 실험시공하였으며 강의 유역에서 시공했기 때문에 파도나 빙하의 영향은 없었다. 설치된 석션버켓의 중량은 대략 140t 이며 관입시간 6시간을 포함하여 총 12시간에 걸쳐 2002년도에 완공 되었으며, 3.0MW Vestas V90터빈이 같은 해 말에 설치되었다 (Ibsen and Brincker, 2004). 대구경 석션버켓기초는 변위, 구조물-지반 상호작용, 강성, 그리고 피로에 대한 장기간 모니터링을 중점적으로 하고 있다. 따라서 기초와 터빈의 동적 변형을 측정할 수 있는 모니터링 시스템, 장기 변위와 기초의 회전을 측정하는 시스템, 그리고 기초 내부의 간극수압을 측정하는 시스템이 갖추어져 자료를 수집할 수 있다.

표 2. 얕은 수심에 설치된 석션버켓기초 사례들 (Houlsby et al., 2005c)

지명	지반	수심 $h_w$ (m)	직경 $D$ (m)	길이 $L$ (m)
Wilhelmshaven	모래층	6.0	16.0	15.0
Frederikshavn	모래층	1.0	12.0	6.0
Frederikshavn	모래층	0.2	2.0 4.0	2.0 4.0
Sandy Haven	모래층	0.5	4.0	2.5
Tenby	모래층	2.0	2.0	2.0
Burry Port	모래층	0.5	2.0	2.0
Luce Bay	모래층	0.2	3.0 1.5	1.5 1.0
Bothkennar	점토층	0.2	3.0 1.5	1.5 1.0



그림 7. Frederikshavn의 석션버켓기초의 현장실험 a) 설치중 b) 설치후

표 3은 석션버켓기초의 거동 해석을 위해 수행된 현장실험을 정리한 표이다. 대부분 현장실험은 일정한 연직하중과 모멘트하중 하에서의 석션버켓의 거동을 이해하고 분석하는 방식으로 수행되었다. 이중 Frederikshavn의 대구경 (12m직경) 석션버켓기초의 설계에 사용하기 위해 여러 실내실험과 2m 직경 석션버켓을 설치하여 현장실험이 수행되었다. 실내실험에서는 직경을 0.2, 0.3, 0.4m로 변화시켜 실험을 수행하였으며 대구경 기초의 경우 하중의 작용점이 10m부터 3MW급 터빈이 설치된 104.4m까지 변하게 되므로 실험으로부터 유추 가능하도록 원형의 크기에 대해 스케일이 맞도록 조정하였다. 그림 8 a)는

2m 직경 석션버킷의 현장실험을 보여주고 있으며 그림 8 b)는 연직하중이 37.3kN인 경우 17.4m 높이에서의 모멘트와 석션버킷의 회전의 관계식을 보여준다.

표 3. 모멘트 하중에 대한 석션버킷의 거동 현장실험 (Houlsby et al., 2005c)

지명	지반	직경 D (m)	길이 L (m)
Frederikshavn	모래층	12.0	6.0
Frederikshavn	모래층	2.0	2.0
Sandy Haven	모래층	4.0	2.5
Burry Port	모래층	2.0	2.0
Luce Bay	모래층	3.0	1.5
Bothkennar	점토층	3.0	1.5

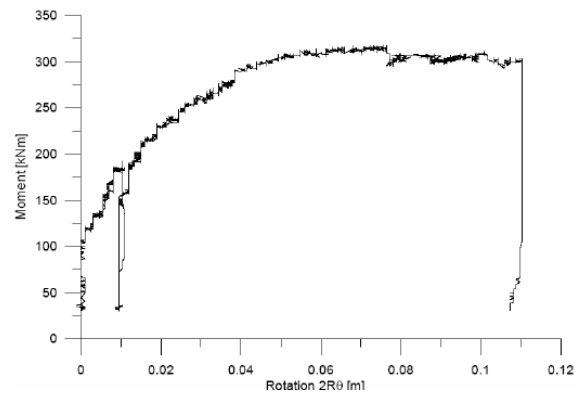
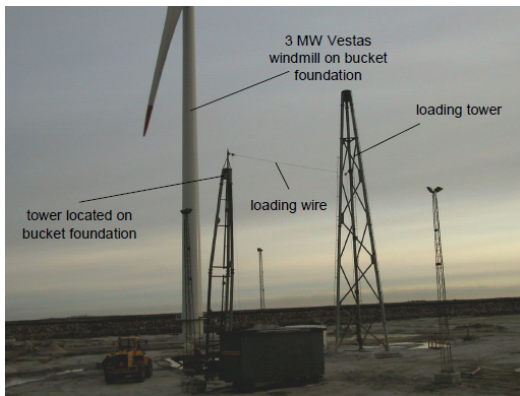


그림 8. a) 석션버킷기초 현장실험 현장(2mx2m) b) 회전각과 모멘트의 관계

Luce Bay에서 행한 실험은 Oxford 대학교에서 설계하고 Fugro Ltd에서 수행하였는데, 버킷기초 실험을 위해 전용 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 유압잭을 이용하여 상대적으로 큰 하중을 저주파수로 반복하여 적용할 수 있는 장치와, 상대적으로 작은 크기의 하중을 12Hz 주파수로 반복하여 적용할 수 있는 장치 (SEMV)를 사용하였다 (그림 9). 반복하중으로부터 모멘트와 회전각에 관계를 얻을 수 있으며, 그로부터 전단계수가 회전각에 따라 줄어드는 현상을 볼 수 있었다.

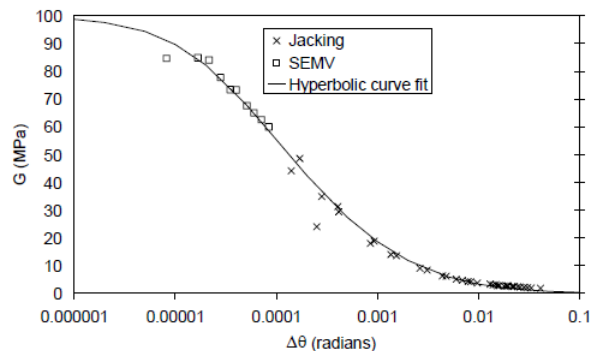


그림 9 a) 1.5m 와 3.0m 석션버킷이 설치된 실험장비, b) 전단계수와 회전각과의 관계

### 수치해석

석션버킷기초의 여러 하중 조합에 대한 수치해석은 여러 연구자들에 의해서 연구되었다. Doherty et al. (2004, 2005)는 다양한 설계인자의 석션버킷의 거동에 대한 영향에 대해서 연구를 하여 기초의 유연성과



연직하중, 모멘트를 고려한 강성계수를 제시했다. 실내실험은 물론 현장실험에서도 실험환경의 제약으로 인해 연직하중, 수평하중 그리고 모멘트가 한 평면상에서 작용하도록 하고, 수치해석에서도 비슷한 방식을 사용해 왔다. 그렇지만, 실제 수평하중의 경우 여러 방향에서 작용하기 때문에 기초에 토션(torsion)이 작용할 수도 있다 (Bienen et al., 2005). 최근에 전도 모멘트가 석션버켓기초의 지지력에 미치는 영향에 대한 수치해석과 토션이 지지력에 미치는 영향등에 대한 다양한 연구가 수치해석을 통해 이루어져 왔다 (Wang and Jin, 2008; Bransby and Yun, 2009; Zhan and Liu, 2010).

### 현장적용 및 미래 계획

프로토타입중 두 번째 석션버켓기초가 독일의 Wilhelmshaven에 설치될 예정이었으나 설치과정에서 설치 바지선이 석션버켓과 충돌하는 예상치 못한 사고로 인해 실패한 바 있다. 설치용 석션버켓은 16m 직경에 15m 길이이며 무게는 대략 400톤 가량으로 예정되어 있었으며 5.0MW Enercon 터빈이 설치될 예정이었다.

Aalborg 대학과 MBD Offshore Power 그리고 Dong Energy는 5년 이상의 연구 끝에 프로토타입 석션버켓기초를 Horns Rev II에 설치하여 기상관측에 활용하고 있다. 설치된 석션버켓은 직경 12m, 6m길이이며 165톤에 이르는 것으로 수심 15m 깊이에 설치되었다 (그림 10). 설치시 수직각이 0.1도 이내로 정밀도를 유지할 수 있었다. Dong Energy는 2010년 말이나 2011년 초에 3.6MW 터빈을 해상에 설치할 계획을 세우고 있다. 비록 현재의 기술이 단말뚝 석션버켓기초의 설치를 목표로 매진하고 있으나 더 깊은 수심에서 필요한 트라이포드형 석션버켓기초의 시공을 위한 끊임없는 연구도 필요할 것으로 예상된다 (그림 11).



그림 10. Horns Rev II에 설치된 석션버켓기초



그림 11. 트라이포드 석션버켓기초 개념도

## 5. 결론

본 논문에서는 석션버켓기초의 국내외 세계 연구동향에 대해서 정리해 보았다. 해상풍력단지 조성을 위한 석션버켓기초는 국내는 물론 해외에서도 적용되지 않은 불모지라고 볼 수 있다. 국내에서는 부유체의 고정을 위한 석션버켓의 사용에 대한 연구결과가 있으며, 신개념 부유식 방파제 연구를 통해 석션버켓기초에 대한 많은 지식과 시공경험을 보유하고 있다. 영국과 덴마크를 포함하는 유럽 국가들은 오랜기간 동안 해상풍력 석션버켓기초의 거동에 대해 이론, 수치해석, 실내실험, 현장실험, 현장실증시공등을 통해 연구를 지속해 왔으며, 그 결과물로 수심 15m 에 석션버켓을 이용한 기상관측탑 설치를 완료하였다. 하지만 아직 해상풍력단지 조성에 직접적으로 적용된 사례가 없어 발 빠른 연구와 실증시공으로 기술력을 입증 할 수 있다면, 세계 수준의 기술을 능가할 수 있을 것으로 보여진다.

## 참고문헌

- 한국해양연구원 (2009) “대수심 방파제 및 연약지반 관련기술”
- 해양수산부 (1999) “항만 및 어항 설계기준”
- 건설교통부 (2009) “도로공사표준시방서”
- Bang, S., and Cho, Y., (2003) "Investigation on Suction Pile Retrieval," Int. Conf. on Foundations, Dundee, Scotland, Sep.
- Bang, S., and Cho, Y., and Kim, YS (2003) "Calibration of Analytical Solution Using Centrifuge ModelTests on Mooring Lines," 13th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. & Exhibition, Hawaii, USA, May, ISOPE 2003-JSC-122.
- Bang, S., and Cho, Y., (2001) "Use of Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases - Task 6 Completion Report: centrifuge Model Tests," US Naval Facilities Engineering Service center, USA.
- Byrne, B.W., and Housby, G.T. (2006) "Assessing Novel Foundation Options for Offshore Wind Turbines."
- Doherty, J.P., Deeks, A.J. and Housby, G.T. (2004) "Evaluation of Foundation Stiffness Using the Scaled Boundary Model." Proc. 6th World Congress on Computational mechanics, Beijing 5-10 Sept.
- Doherty, J.P., Housby, G.T. and Deeks, A.J. (2005) "Stiffness of Flexible Caisson Foundations Embedded in Nonhomogeneous Elastic Soil." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 131(12), pp. 1498-1508.
- Housby, G.T., and Byrne, B.W. (2005a) "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Clay and Other Materials", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 158, No. GE2, April, pp 75-82.
- Housby, G.T., and Byrne, B.W. (2005b) "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 158, No. GE3, July, pp 135-144.
- Housby, G.T., Ibsen, L.B., and Byrne, B.W. (2005c) "Suction Caissons for Wind Turbines." Frontiers in offshore Geotechnics: ISFOG 2005, Gourvenec & Cassidy (eds) pp. 75-93.
- Ibsen, L.B., and Brincker, R. (2004) "Design of New Foundation for Offshore Wind Turbines." Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC), Detroit, Michigan.
- Tjelta, T., Asa, PM, Hermstad, J., and Naes, E., (1990) "The Skirt Piled Gulfaks C Platform Installation," Proceedings of 22nd Offshore Technology Conference, Texas, Paper No OTC 6473.
- Zhan, Y., and Liu, F. (2010) "Numerical analysis of Bearing Capacity of Suction Bucket Foundation for Offshore Wind Turbines." Electrical Journal of Geotechnical Engineering, p 633-643.