

2 석션파일공법을 중심으로 본 해상풍력기초공법

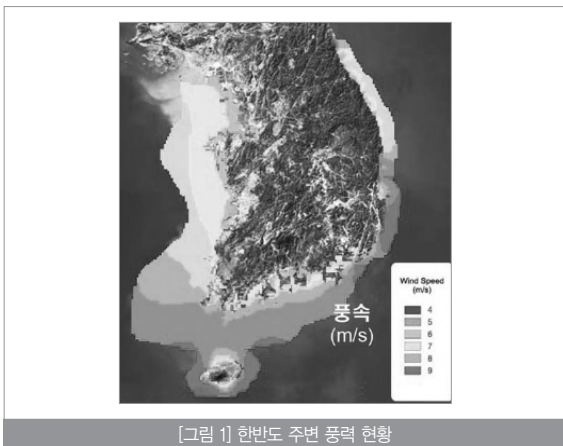
글 김재윤 \ 토목기술팀 사원 \ 전화 02-3433-7418 \ E-mail jykim@ssyenc.com

1. 머리말

최근 들어 해안 및 심해 개발의 중요성이 대두됨에 따라 해안과 심해에 여러 종류의 토목구조물이 건설되고 있으며 향후 그 종류와 수가 늘어날 전망이다. 해안이나 심해에 건설되는 구조물 또한 육상구조물과 같이 기초를 설치해야 하지만, 그 작업은 환경적·경제적인 제약으로 인해 가능한 공법이 많지 않다. 본고에서는 친환경 에너지로 각광받고 있는 해상풍력자원의 연구 현황 및 그에 적용된 기초공법을 소개하고, 그 중 경제적인 해상 기초공법 중 하나인 석션파일에 대해 소개하고자 한다.

2. 해상풍력 연구 현황

2-1. 국내 해상풍력자원



[그림 1] 한반도 주변 풍력 현황

국내의 해상풍력자원은 지리적 잠재량이 우수하다. 한반도 주변은 0~30m 수심으로 해상면적의 약 17.5%이며, 예상 가능 공급 전력량은 20.1TWh/year 정도가 된다. 특히 제주도과 남해가 [그림 1]과 같이 가장 우수하다.

2-2. 국내 해상풍력 연구 현황

해상에서는 육상에 비해 동일 풍속 대비 낮은 고도에서 양질의 바람에너지를 얻을 수 있기 때문에 해상풍력발전의 건설이 점차 증가하는 추세이다. 국내에서는 정부가 해상풍력추진 로드맵(지경부, 2010)을 발표하였고, KEPCO 및 발전사는 서해안 2.5GW 해상풍력단지 개발을 위한 계획 수립을 수립하여 그 가능성을 검토하는 등 해상풍력발전에 대한 연구에 박차를 가하는 중이다.

2-3. 해외 해상풍력 연구 현황

1) 덴마크

- 1차 석유위기 이후, 대체에너지원인 풍력발전을 이용하는 방법 모색
- 세계 최초의 해상풍력단지인 Vindeby와 대규모 해상풍력단지의 벤치마크가 되고 있는 Horn Rev를 운영하고 있음
- 현재, 전체 전력의 25%를 풍력에너지를 얻고 있음

2) 스웨덴

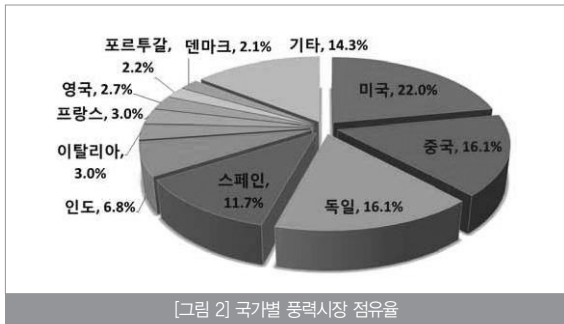
- 스웨덴 의회는 1990년대 초반 “지속 가능한 에너지 공급법안”을 통과시킴
- 장기적으로 친환경 재생에너지를 이용하여 핵발전을 대체하기

위한 계획을 수립함

- 현재 해상풍력단지가 건립되어 550kW 이상 2.3MW급 이하의 풍력발전기 65기가 가동되고 있음

3) 독일

- 1970년대 중반부터 대형 풍력발전시스템에 대한 연구개발을 진행해 왔음
- 1991년 신재생에너지 지원정책인 "전력공급법"을 제정한 이후 2MW~5MW의 풍력발전 기술을 확보함
- 해상풍력발전을 이용하여 2030년까지 20~50GW의 설치용량을 추진 중에 있으며, 향후 30년간 독일 전력사용량의 최대 15%를 충당하는 계획을 수립함



3. 해상풍력기초의 종류 및 특징

이러한 해상풍력발전의 기초는 크게 Mono pile, Gravity base, Suction pile, Jacket pile과 같이 4가지 Type으로 분류 할 수

표 1 해상풍력기초의 종류 및 특징

종류	특징
 MONO PILE	<ul style="list-style-type: none"> • 현재 가장 많이 쓰이고 있는 해상풍력단지 기초 • 설치 수심은 25~30m • 해저면에 대구경파이일을 항타 또는 드릴링 하여 고정 • 대단위 단지의 경우 경제성이 우수 • 부재에 대한 피로 하중이나 부식의 문제가 발생
 GRAVITY BASE	<ul style="list-style-type: none"> • 가장 일반적인 기초형식 • 설치수심은 25m까지 적용가능 • 해저지반 정리가 필요 • 제작이 간단하며 경제적 • 설치하기 위한 특수장비 필요 • 항타시 소음과 진동의 문제 • 부재의 피로하중이나 부식 문제 발생

있다. 각 기초의 특징은 <표 1>과 같다.

4. 석션파일의 공법 및 메커니즘

4-1. 석션파일공법

석션파일은 파일 내부의 물이나 공기와 같은 유체를 외부로 배출 시킴으로써 발생된 파일 내부와 외부의 압력차를 이용하여 설치 되는 파일을 말한다. 석션파일의 형상은 음압을 가하기 용이하게 상단부는 밀폐되고 하단부가 열린, 컵을 엮어놓은 모양을 하고 있다. 석션파일을 해저면에 안착시키면 기초의 자중에 의하여 파일 하단부가 해저면의 일정 깊이까지 관입하게 된다. 이 상태에서 기초 두부에 설치된 음압 장치를 이용하여 기초 내부의 물을 외부로 배수시킨다.

석션파일의 구조는 기초 하단부를 제외한 모든 부분들이 물의 흐름이 완전히 차단되어 있으므로, 배수된 물은 기초 하단부의 지반을 통해서만 유입될 수 있다. 따라서 외부의 물이 유입되어 배수된 물을 회복하는 것이 방해 받게 되고, 이로 인하여 기초 내부의 압력이 저하된다. 그 결과 기초 내부와 외부의 압력차가 발생하게 되며, 석션파일의 구조상 수평방향으로는 힘이 발생하지 않게 되어 이 힘에 의하여 기초가 관입되게 된다.

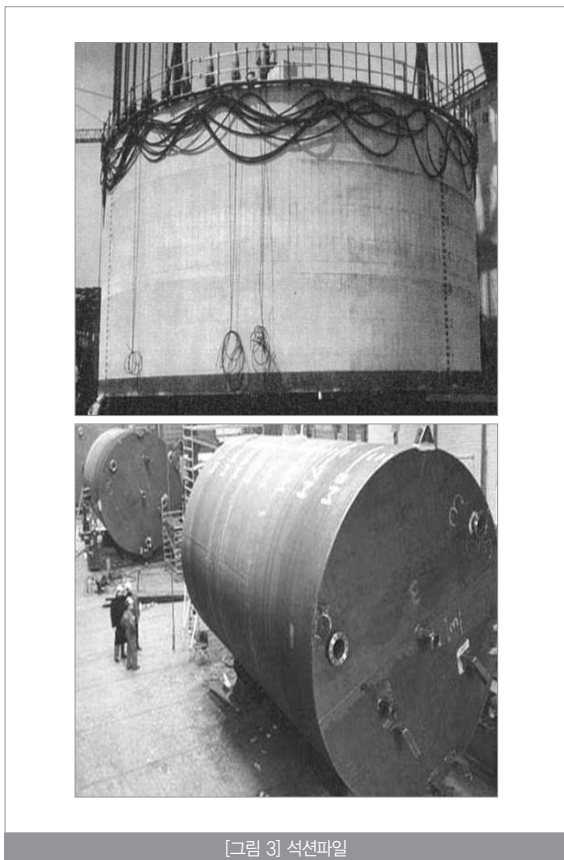
기초의 관입을 방해하는 저항력은 기초 하단부의 선단지지력과 주면마찰력에 의하여 결정되며, 관입력이 저항력보다 크면 기초는 관입하게 된다. 일정한 관입깊이에 대하여 석션파일의 관입유도력은 기초 외부와 내부의 압력차와 기초의 단면적인 직경의 제곱에 비례하지만, 저항력은 직경에 비례하므로 기초의 직경이 클수록 작은 압력차로도 설치가 가능하다.

종류	특징
 SUCTION PILE	<ul style="list-style-type: none"> • Suction pressure를 이용한 기초형식 • Tripod, Jacket type으로 구성 가능 • 설치수심에 제약이 받지 않음(최대 1600m 수심에 설치됨) • 설치가 비교적 간단하고 중장비가 불필요 • 시공경험이 부족하여 거동분석이 필요
 JACKET PILE	<ul style="list-style-type: none"> • Tripod타입으로 주로 사용 • 설치수심은 20m~80m까지 적용가능 • Jacket 구조위에 Pole, Turbin 등을 설치 • 해저지반 처리가 불필요 • Mono pile이나 중력식기초에 비하여 설치비용이 높으나, 수평력에 따른 모멘트 저항에 유리

석션파일의 또 다른 기술적 특징으로는 인발시 설치시와 반대로 파일 내부로 물을 주입하여 파일 내부에 양압력을 가하면 쉽게 인발할 수 있다는 것이다. 따라서 기 시공된 석션파일을 인발하여 재시공할 수 있기 때문에 한번 만들어진 파일 구조물을 반복해서 사용할 수 있다.

석션파일의 크기(직경 및 길이)는 지층상태에 따라 결정된다. 모래질 지반에 기초를 설치할 경우 관입성은 떨어지지만 지지력이 높기 때문에 기초의 길이는 직경의 1/2 크기만큼 작게 된다. 점토질 지반일 경우 관입성은 높으나 지지력이 떨어지기 때문에 기초의 길이는 직경의 8배 정도가 된다. 자갈층에서는 관입시 파이핑 현상이 발생할 수 있기 때문에 자갈층으로 이루어진 해저지반에서는 석션파일을 적용할 수 없다.

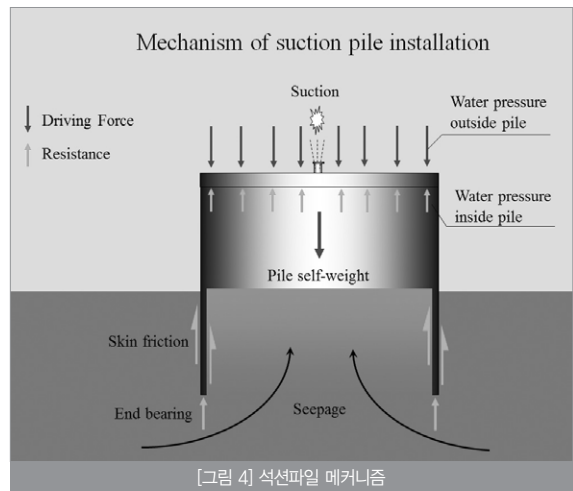
석션파일은 주로 강재나 콘크리트로 제작되지만, 구조적인 안정성만 확보된다면 복합소재, 목재 등 다양한 재료로 제작할 수 있다.



[그림 3] 석션파일

4-2. 석션파일의 메커니즘

아래의 [그림 4]는 석션파일의 메커니즘을 나타내는 그림이며, 관입할 때 작용하는 힘으로는 기초의 자중에 의한 무게와 석션압이

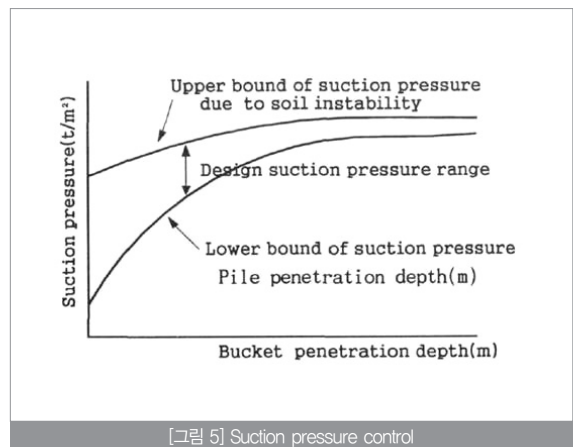


[그림 4] 석션파일 메커니즘

대표적이라고 할 수 있다.

석션파일을 설치할 때 중요 설계인자로는 기초 내부와 외부의 압력차, 물의 유입 및 기초관입으로 인한 지반 교란, 보일링, 플러깅 등이 있다. 이 모든 인자들은 서로 유기적인 상관관계로, 석션파일을 설계할 때 음압의 경계를 결정짓는 중요한 인자로서 음압은 다음의 두 경계 사이의 어떠한 값이 되어야 할 것이다.

첫 번째로 압력차가 너무 작아서 관입력이 지반의 저항력을 극복하지 못하면 기초의 관입이 불가능하게 된다. 기초가 지반의 저항력을 극복하여 관입하는데 필요한 최소한의 압력차를 하한 압력차라고 한다. 둘째로 압력차가 너무 크면, 모래층의 경우에는 기초 외부로부터 내부로 유입되는 급속한 물의 흐름으로 인하여 발생된 상향 침투력에 의하여 보일링 현상이 발생하고, 점토층의 경우는 기초내부의 점토가 기초 하단부에서 절단되어 밀려 올라오는 플러깅 현상이 발생한다. 이에 해당하는 압력차를 상한 압력차라고 부른다.



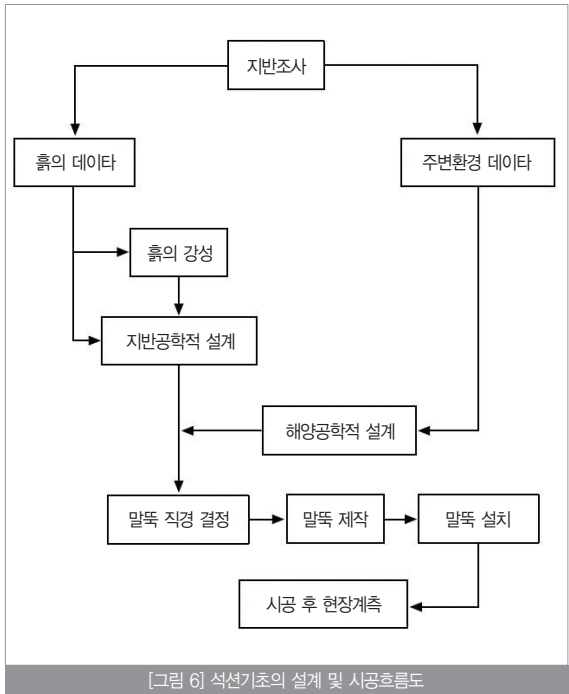
[그림 5] Suction pressure control

기초내부의 압력이 상한 압력차를 초과하는 경우 기초 내부가 토사로 가득 차 더 이상의 기초 관입이 불가능해지며 설치에 실패하게 된다. 따라서 설계압력차는 상한 압력차와 하한 압력차의 사이에 어떤 값이 된다. [그림 5]는 석션파일의 관입 깊이에 따라 설치하기에 적당한 압력을 나타낸 것이며, 적정압력은 지반의 물리적 특성과 관입깊이에 따라 연속적으로 변화하기 때문에 지반의 특성과 관입깊이에 따라 자동으로 조절하는 것이 필요하다.

5. 석션파일의 설계 및 시공흐름

5-1. 석션파일의 설계흐름

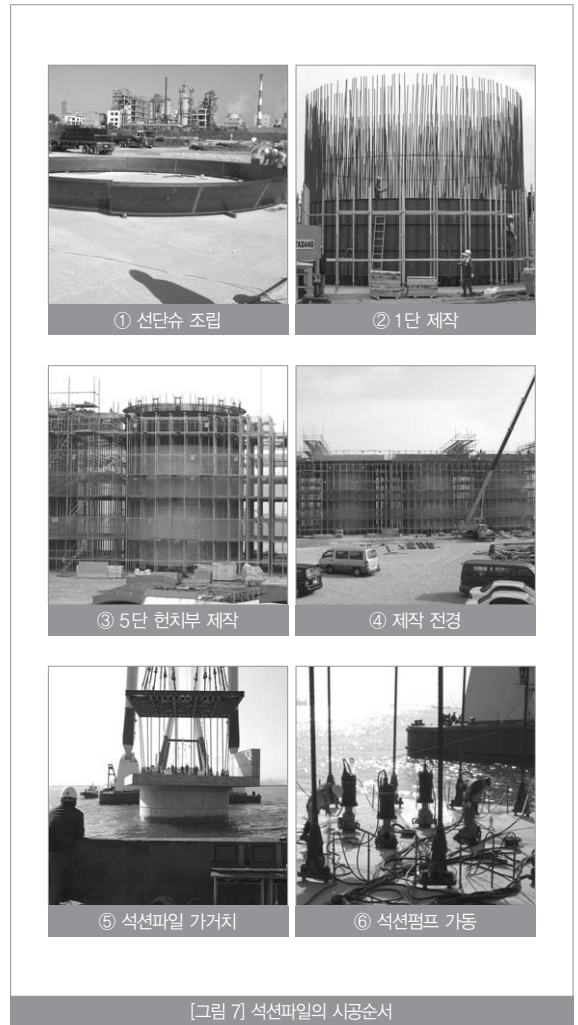
모든 구조물을 설치할 때에는 지반조사를 실시하여 설계를 위한 기초자료를 수집할 수 있다. 지반조사는 석션파일이 설치될 지반인 토층의 구성, 상태 및 흙의 특성 등의 자료를 얻기 위한 조사로써 말뚝 설계를 위한 가장 기초적이며 기본이 되는 것이다. 이러한 지반조사는 석션파일의 설계 및 시공이 안전성과 경제성을 가지도록 하며, 필요한 지반에 관하여 필요한 정보를 얻고자 하는 목적으로 시행된다. 지반조사를 통해서 얻어진 기초 자료들을 지반공학적 설계 및 해양공학적 설계에 반영하고 수치해석을 통해 석션파일의 직경을 결정하며, 마지막으로 석션파일을 제작하게 된다. 석션파일이 제작된 후, 현장의 조건에 따라서 시공방법과 시공순서를 결정하게 된다. 시공은 여러 자료와 주변 환경을 고려하



여 시공을 수행한다. 하지만, 석션파일 시공시 발생하는 흙의 교란에 의해 현장조건의 많은 변화가 생길 수 있으므로 시공이 완료된 후에도 현장의 계측에 의한 지속적인 확인 작업이 필요하다. [그림 6]은 위에 설명된 석션파일의 설계 및 시공흐름을 도식화하여 나타낸 것이다.

5-2. 석션파일의 시공순서

아래의 [그림 7]은 석션파일의 시공순서이다. ①번 사진은 처음 기초가 지반에 맞닿게 될 때 관입의 유리를 위하여 선단부분에 슈를 시공하는 것이다. ②~④번은 석션파일을 콘크리트를 이용하여 완성시키는 사진으로, 길이와 지름에 따라 단을 조정하여 시공에 편리함을 줄 수 있다. 완성된 석션파일을 운송선을 이용하여 현장에 쉽게 운반할 수 있으며, 마지막 ⑥번 사진과 같이 펌프를 이용하여 관입하게 된다.

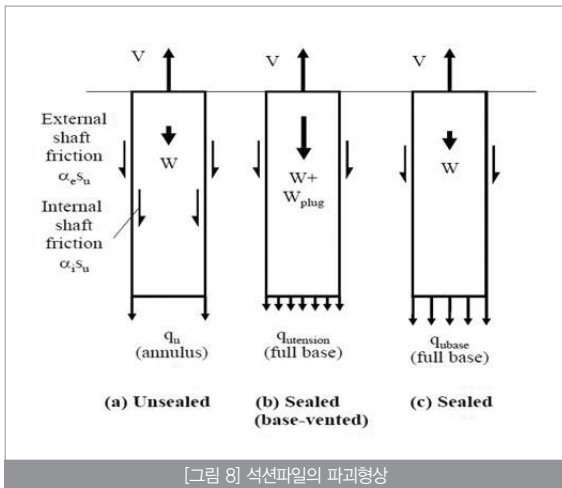


6. 석션파일 파괴거동 형태 및 인발시의 지지력

6-1. 석션파일 파괴거동 형태

석션파일에 장력 재하시 지지력은 석션파일에 의한 지반 파괴형상에 따라 예측방법을 달리 해야 한다. Randolph와 House(2002)는 발생 가능한 파괴형상을 아래의 [그림 8]에서 보여주듯 3가지로 분류하였으며, 각각을 ① Sliding Failure ② Tensile Failure ③ Reversed end Bearing Failure로 나누었다. 각 파괴형상에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

- Sliding Failure : 배수조건(Long Term)에서 파일의 상부가 들려있어 Passive Suction이 발생하지 않는 경우 말뚝의 내부와 외부의 가장 자리에서 흙과 말뚝이 분리되는 전단 파괴이다.
- Tensile Failure : 부분적인 배수로 인해 부분적인 Passive Suction이 발생하게 되어 플러그 된 토양과 말뚝아래의 흙이 분리되면서 파괴가 일어난다.
- Reversed end Bearing Failure : 상부가 밀봉된 말뚝일 경우 비배수 조건(Short Term)에서 발생하게 된다. 말뚝 내부에 Passive Suction이 발생하여 플러그된 흙이 말뚝과 분리되는 것을 막아 말뚝과 흙이 함께 뽑히는 파괴형상으로 세 가지 형상 중 Pull-out Capacity가 가장 크다.



[그림 8] 석션파일의 파괴형상

6-2. 석션파일 인발시 지지력 계산식

6-1에서 소개한 바와 같이 Pull-out Capacity는 3가지 파괴형상에 대하여 각기 구해야 한다. 첫 번째 파괴형상인 Unsealed Pull-out(Sliding Failure)의 경우 파괴는 파일 내부의 벽을 따른 Sliding에 의해 발생하게 되며, 지지력은 아래의 식을 이용하여

예측할 수 있다.

$$V_u = W + Q_{s,i} + Q_s = W + \alpha_i S_{u,ss,avg} A_{p,i} + \alpha_e S_{u,ss,avg} A_p \quad \text{식(1)}$$

여기에서, V_u 는 Net pullout force at failure, α_i , α_e 는 Internal and external interface friction ratio, $A_{p,int}$, A_p 는 Internal and external perimeter area of caisson, $S_{u,ss,avg}$ 는 Average simple shear undrained shear strength over the caisson length이다.

부분적인 배수상태일 경우에 발생가능한 두 번째 파괴형상인 Tensile failure(sealed, base vented)는 플러그 된 지반이 말뚝과 함께 붙어서 나오는 경우이며, 이 경우에는 수중중량인 W' 와 플러그 된 지반의 무게인 W'_{plug} 를 더하고, 외부 주면마찰력과 선단지지력을 합한 값으로 아래의 공식으로 예측 가능하다.

$$V_u = W' + Q_{s,e} + W'_{plug} + Q = W' + \alpha_e S_{u,ss,avg} A_p + W'_{plug} + Aq_t \quad \text{식(2)}$$

여기에서 q_t 는 Unit bottom resistance로 바닥에서 Suction이 얼마나 발생했는지에 따라 그 수치가 다르게 나타나며, 부분배수 상태인 경우이므로 매우 불확실한 값을 갖는다.

마지막으로 완전 비배수 상태인 Sealed인 경우인 Reverse end bearing failure가 발생하게 되는데 이때 지지력 공식은 아래와 같다.

$$V_u = W' + Q_s + Q_b = W' + \alpha S_{u,ss,avg} A_p + S_{u,tip,avg} N_c A \quad \text{식(3)}$$

여기에서 α 는 Interface friction ratio($\tau_{i,interface}/S_{u,ss}$), $S_{u,ss,avg}$ 는 Average simple shear undrained shear strength over the caisson length, A_p 는 Perimeter area of caisson, $S_{u,tip,avg}$ 는 Average soil undrained shear strength at caisson tip, N_c 는 Reverse end bearing factor, A 는 Cross sectional area of caisson이다.

이와 같은 식에서 보여주듯이 주면마찰력은 α 의 함수에 의해 정의되며, Bearing capacity factor인 N_c 에 의해 선단에서 발생하는 지지력을 구할 수 있다.

7. 석션파일 적용사례

석션파일 구조물은 1960년 일본 고베항의 방파제에 사용한 시공 사례가 있고 유럽에서는 북해의 석유굴착리프의 기초로 활용되고

있다. 석션파일의 설치 수심은 10m에서 최대 1600m 정도이며, 이 사례는 석션파일 기초의 높은 대수심 적용성을 보여준다. 석션파일기초 구조물이 해양 및 항만구조물에 적용된 사례는 아래 <표 2>와 같다.

표 2 석션파일기초 구조물 적용 사례

년도	시설명
1906	일본, 고베항 제5방파제(PC 판식 원통블럭)
1980	덴마크, Gorm(석션앵커파일)
1989	노르웨이, Gull faks C-GBS(중력식 플랫폼)
1991	노르웨이, Snorre-TLP(CFT)(텐션 레크 플랫폼)
1992	노르웨이, Snorre-SPS(해저생산시스템)
1994	노르웨이, Europipe riser(강재자켓 플랫폼)
1995	노르웨이, Troll-GBS(중력식 플랫폼)
1999	일본, 나에쓰항 작업기지 방파제(강재기초)
2000	일본, 오사카부 토사채취 잔교 방충공(RC재)

국내에서는 울산북방파제 건설 부지에 석션파일을 이용한 방파제의 시험시공을 한국해양연구원과 대우건설에서 완료했다. 이번에 시험 시공한 석션 파일 기초 방파제는 육상에서 제작한 지름 12m, 길이 14.5m의 대구경 원형파일을 지지층(암반)까지 석션 공법을 이용해 설치하고 그 위에 케이슨을 설치해 완성했다. 완성된 방파제는 아래 [그림 9]와 같다.



[그림 9] 석션파일기초 방파제

8. 맺음말

해양 및 항만구조물의 건설을 제약하는 대표적인 요인은 대수심, 연약지반 등의 조건이다. 이러한 제약조건에도 불구하고 해양자원 활용을 위해 해양구조물에 대한 건설 수요는 앞으로도 지속적으

로 증가될 것이다. 따라서 석션파일 기초 설계 및 시공기술이 확보되면 장기적으로 해상풍력발전이나 해양자원개발, 해상공항 등 해양구조물 건설기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. S

참고문헌

- ① 재단법인 연안개발기술연구원(2001), "양산 풍력발전의 기술 매뉴얼(기초공법에 중점을 두어)", 해안개발기술라이브러리 No.14
- ② 이명재(2011), "수치해석을 통한 버켓기초의 인발거동과 극한지지력에 관한 연구", 홍익대학교
- ③ 윤길림(2011), 해상풍력기초 강관말뚝 설계·시공 기술현황, 한국해양연구원
- ④ 조영기(2003), Suction Pile 공법과 신개념 해상구조물
- ⑤ 한상훈(2004), 석션파일은 이용한 해양·항만구조물, 콘크리트학회지 제16권 6호
- ⑥ Byrne, B.W., and G.T. Housby (2003), "Foundations for Offshore Wind Turbines," Phil. Trans. Royal Society of London, Vol. 361