

석션앵커 설계, 시공 및 모니터링 (Part1)

Suction anchor design, installation and monitoring (Part 1)



Per Sparrevik
Technical expert
Monitoring and
Instrumentation, NGI
(per.sparrevik@ngi.no)



Morten Saeue
Division leader
Monitoring and
Instrumentation, NGI
(morten.saeue@ngi.no)



Yunsup Shin
Senior engineer
Offshore energy and
geotechnics, NGI
(yunsup.shin@ngi.no)



Thomas Langford
Division leader
Offshore energy and
geotechnics, NGI
(thomas.langford@ngi.no)

1. 소개 (Introduction)

석션앵커 (석션 파일 또는 석션케이슨)는 직경이 크고 말뚝 선단이 열려 있는 그림 1과 같은 형태의 말뚝기초를 말하며, 석션파일의 직경은 일반적으로 3 m - 8 m 정도, 길이는 10 m - 25 m 정도까지 설치되는 즉, 말뚝직경과 말뚝 길이의 비 (L/D)가 일반적으로 3 - 6 또는 그 이상이 되는 해양 기초구조물이다. 석션앵커는 많은 장점을 가지고 있으므로 90년대 후반부터 해양구조물을 시공하는데 많이 활용되고 있으며, 설계 및 시공에 대한 기술도 이미 다양한 방법으로 검증되어 전 세계적으로 많이 사용되고 있는 해양 기초구조물 중 하나이다.

그림 1(a)에서 보는 것과 같이 Gulf of Mexico지역 Horn Mountain field에서 사용한 석션앵커는 직경 5.5 m, 길이 27.4 m인 석션앵커이며, 그림 1(b)와 같이 독일Borkum Riffgrund 1단계에서는 해상풍력 기초 구조물로 직경 8 m, 길이 8 m 석션앵커 (석션파일)가 적용되었다.

일단 석션앵커가 시공되면 말뚝기초 중 짧은 말뚝 (short pile foundation) 거동을 내타내면서 말뚝 선단 및 주변에 대한 연직 및 수평 지지력을 발휘하게 된다. 석션앵커와 연결된 mooring라인의 위치와 하중이 작용하는 각도에 따라 지지력 (holding capacity)이 달라지게 되며, 석션앵커와 연결되어 있는 mooring 라인은 석션앵커 패드아이 (padeye)에 고정된다. 이때 패드아이의 위치에 따라 석션앵커의 지지력과 파괴형상, 파괴에 대한 안전율이 달라진다. 패드아이는 일반적으로 앵커 깊이의 60-70% 정도 깊이에 설치된다.

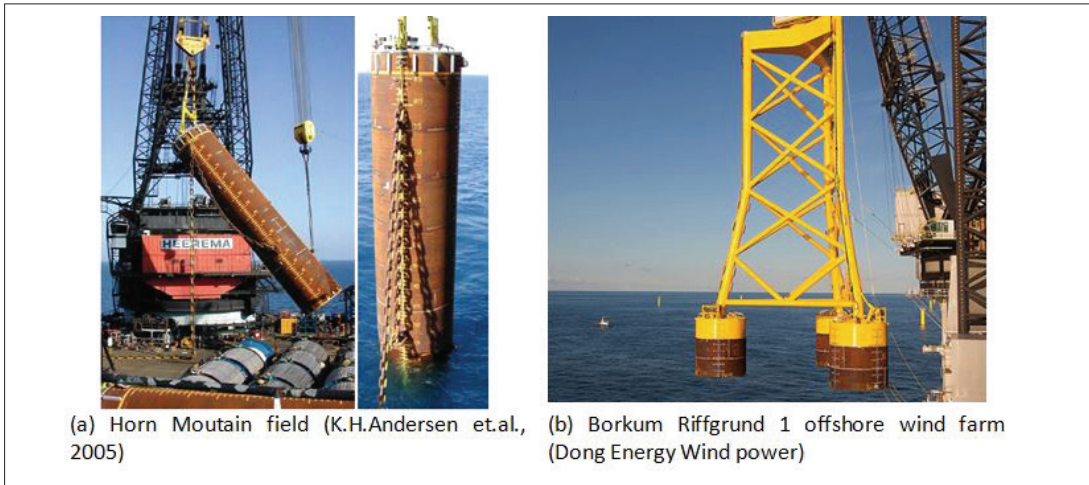


그림 1. 석션앵커의 시공 모습

석션 앵커 관입력 (penetration resistance)은 말뚝 외부의 정수압과 줄어든 내부의 압력차에 의해서 발생되며, 앵커의 자중과 함께 말뚝 관입성 여부를 계산할때 사용된다. 석션앵커 관입시공 시 말뚝내부는 외부와 차단되며 이때 발생하는 부압 (underpressure)은 케이슨 선단의 지지력을 발생시키며 외부 하중에 저항하게 된다.

오늘날 석션 앵커는 전 세계적으로 해양 구조물을 시공하는데 매우 다양하게 사용되고 있으며, 지반조사가 잘 수행된 지역에 대해서 다음과 같은 장점들이 있다.

- 앵커의 설치 후 지지력 확인을 위한 재하시험을 할 필요가 없다. 그 이유는 석션 앵커를 시공할때 설치 위치와 관심 심도를 설계 기준에 맞춰 정확하게 조정할 수 있기 때문이고,
- 석션 앵커 설계 방법은 각종 모델테스트 및 시험결과로 이미 검증 된 방법을 사용하고 있기 때문이다.

최근 해양 구조물에 대한 석션앵커의 사용량은 점점 증가되고 있으며, 2017년 현재 약 3000 개의 석션 앵커가 북해 (North Sea) 해상 및 50 여 개국에 설치되었고, 2000 m 이상 대심도 해상 지역 (North Sea, Gulf of Mexico, Offshore West Africa, Offshore Brazil, South China Sea, and Offshore Nigeria etc.)에도 설치되어 있다. 석션 앵커가 설치된 주요 현장은 다음과 같다.

2. 석션 앵커 역사 (Suction anchor history in NGI)

석션 앵커의 역사는 1980년대 석유시추 (oil and gas)를 위한 고정식 구조물을 시작으로 90년대 석유시추 및 저장을 위한 부유식 구조물까지 적용되어 왔으며, 최근 2000년대에는 고정식 해상풍력 기초구조물과 부유식 해상풍력 앵커로까지 확대 적용되고 있다. (그림 2)

초기에는 고정식 구조물을 지반에 고정시켜 구조물의 지지력을 확보하기 위해 석션앵커가 사용되었다. 1985년 북해 (North Sea) 유전개발을 위해 설치된 고정식 구조물 (Gullfaks) 테스트 구간에 석션앵커를 적



표 1. 2000년대 초반 석션 앵커 시공 현장 및 앵커 제원 (K.H.Andersen et.al., 2005)

Year	Field	Area	Floater	Depth	DxL	No.	Operator
				m	m x m		
2000	Hanze	North Sea	-	40	6.5 x 6.1	1	VEBA
2001	Girassol	West Africa	Rise tower	1350	8 x 20	3	TFE
2001	Girassol	West Africa	FPSO	1350	4.5 x 17	16	TFE
2001	Girassol	West Africa	Loading buoy	1350	5 x 18	6	TFE
2001	Girassol	West Africa	Loading buoy	1350	5 x 16.1	3	TFE
2002	Nakika	Gulf of Mexico	FDS	1920	4.3 x 23.5	16	Shell/BP
2002	Horn Mountain	Gulf of Mexico	SPAR	1650	5.5 x 27.4	6	BP
2002	Horn Mountain	Gulf of Mexico	SPAR	1650	5.5 x 29	3	BP
2002	Wenchang	South China Sea	FPSO	120	5.5 x 12.1	9	CNOOC
2003	Barracuda	Offshore Brazil	FPSO	825	5 x 16.5	18	Petrobras
2003	Caratinga	Offshore Brazil	FPSO	1030	5 x 16.5	18	Petrobras
2003	Bonga	Offshore Nigeria	FPSO	980	5 x 17.5	12	Shell Nigeria
2003	Bonga	Offshore Nigeria	FPSO	943	3.5 x 18	9	Shell Nigeria
2003	Red Hawk	Gulf of Mexico	-	1600	5.5 x 22.9	8	Kerr McGee
2003	Devil Tower	Gulf of Mexico	-	1700	5.8 x 34.8	9	Dominion
2003	Ardmore	North Sea	4 cells	78	6.5 x 3	1	Tuscon
2003	Ardmore	North Sea	4 cells		6.5 x 5.5	1	Tuscon
2003	Panyu	South China Sea	-	105	5 x 11.7	9	CNOOC
2003	Holstein	Gulf of Mexico	-	1280	5.5 x 36.3	16	BP
2004	Thunder Horse	Gulf of Mexico	Semi-FPU	1830	5.5 x 27.5	16	BP
2004	Thunder Horse	Gulf of Mexico	Manifolder	1830	6.4 x 23.8	4	BP
2004	Thunder Horse	Gulf of Mexico	PLET	1830	5.5 x 26	4	BP
2004	Thunder Horse	Gulf of Mexico	water injection	1830	3.4 x 19/20	5	BP
2004	Mad Dog	Gulf of Mexico	-	1600	5.7/7.6 x -	11	BP

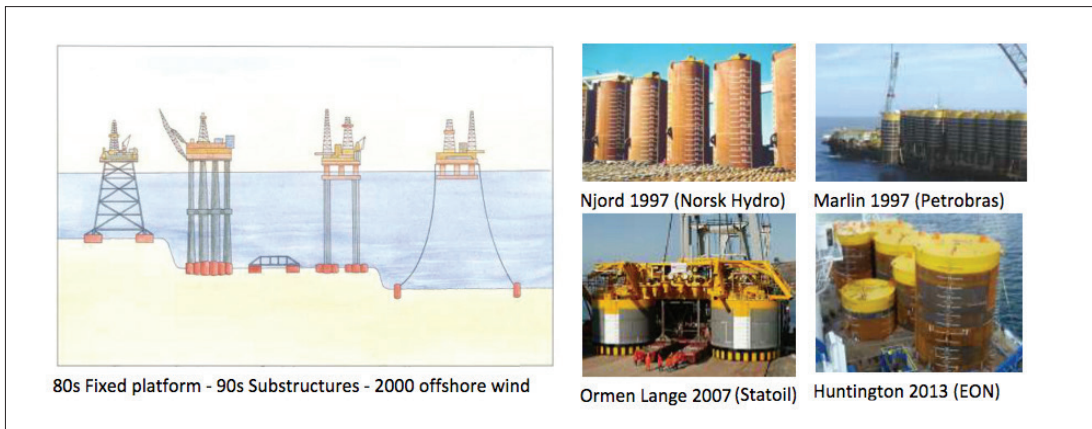


그림 2. 고정식 및 부유식 Oil and gas 플랫폼, subsea 구조물에 적용된 석션 앵커

용된 것을 시작으로, 1991년 북해지역 Snorre 필드 TLP well 구조물에 직경 3 m, 길이가 13 m 석션앵커가 4 본 시공되었다. 90년대 중반부터 부유식 구조물에 석션앵커가 본격적으로 적용되기 시작하여 1997년 Njord FPU 부유식 구조물을 해저면에 고정시키기 위해서 해상지반조사 및 석션앵커에 대한 설계가 수행되었다 (NGI, 1997). 그 이후에는 고정식, 부유식 석유시추 플랫폼뿐 아니라, 각종 Subsea 구조물을 고정시키기 위해서 석션앵커를 활용하고 있으며, 2000년대 이후에는 해상풍력 기초구조물에 석션파일을 활용한 기초공법을 설계, 시공하고 있다.

그림 3 은 과거 고정식 해양구조물에 사용된 석션앵커가 1995년 이후 부유식, 해저구조물에까지 확대 적용되고 있는 석션앵커의 년도 별, 깊이 별 설치 증가 트렌드를 나타내고 있다. 석션앵커는 해상 시공시 일반 항타 말뚝에 비하여 항타소음이 없는 친환경 공법으로 공기를 단축시킬 수 있고, 사용 연한 이후 철거가 비교적 간단하기 때문에 그 활용도가 증가해 왔으며, 오늘날 신재생 에너지원 중 가장 중요한 해상풍력 구조물에도 적용될 수 있으므로 향후 그 활용 빈도가 크게 증가할 것으로 예상된다.

3. 석션앵커 설계 (Design of suction anchor)

(1) 설계 parameters

석션 앵커의 비배수 지지력을 산정하기 위해서는 앵커의 규격 (직경, 높이, 관입깊이)를 결정해야 하며, 시공시 발생할 수 있는 경사 (tilt) 및 회전 (heading), 상부 밀폐도, 하중 크기 및 방향, 패드아이 침도, 지반의 비배수 전단강도, 시공 후 set-up 효과, 반복하중 영향, 파괴시간 (strain rate) 및 앵커 배면의 크랙 발생 여부 등에

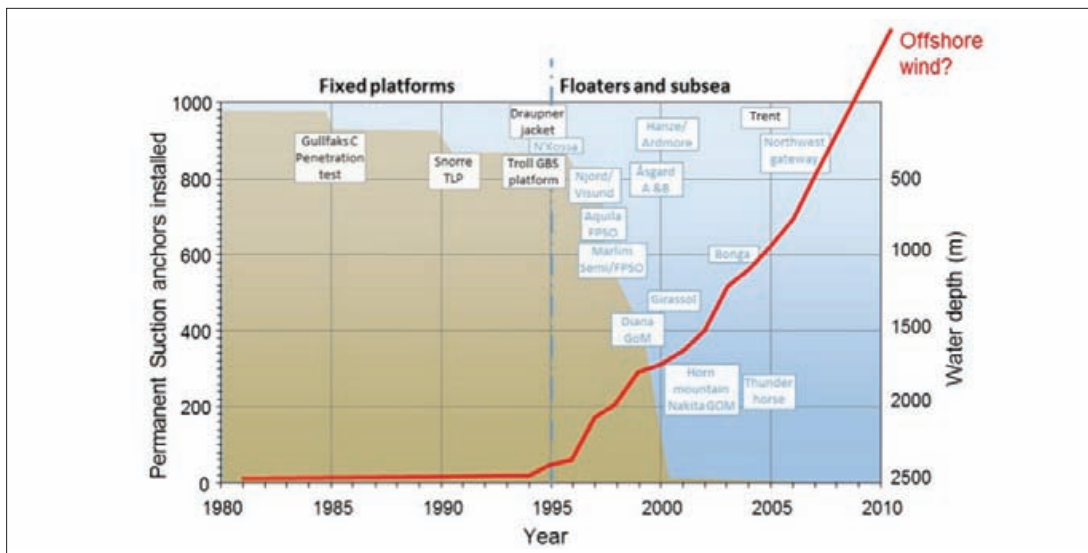


그림 3. 1980년부터 2010년 까지 연도별, 깊이별 석션앵커의 설치 수 증가 추세 (Per Sparrevik, NGI)

대한 고려가 필요하다.

(2) 설계 방법 : 지지력 및 관입력 (holding capacity and penetration)

석션앵커의 지지력 (holding capacity)를 산정하기 위해서 자주 사용되는 방법으로는 단순화된 한계평형법 (simplified limit equilibrium method)을 사용하며, 이때 주면효과 (side effect) 를 적절히 고려할 수 있도록 거칠기 계수 (roughness factor)를 사용하여야 한다. 이러한 한계평형법으로 지지력을 산정하기 위해서는 대표적인 파괴모드를 고려하여 파괴면을 미리 가정해야 하는 단점이 있다.

따라서 최근에는 유한요소해석 (FEM)을 통하여 앵커의 지지력을 산정하는데, 유한요소 해석을 수행하면 지반조건, 앵커 크기 (geometry), 하중 조건 등 설계 조건 요소들을 고려한 파괴 형상을 해석적으로 산정하면서 지지력을 계산하게 된다. 유한요소 해석으로 지지력을 산정할 때는 2D 또는 3D 해석을 할 수 있으며, 2D 해석을 수행할때는 주면효과(side effect)를 적절히 고려하는 것이 매우 중요하다. NGI에서는 많은 데이터 베이스를 바탕으로 지반조건에 따른 적절한 주면효과를 고려하여 석션앵커 설계를 수행하고 있으며, 여러가지 실험 결과와의 비교 검증을 통하여 적절한 설계방법을 수립해왔다. 일반적으로 매우 연약한 대심도 해저지반에서는 세장비가 큰, 길고 가는 석션앵커 설계가 지지력이 높고 경제성이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다.

석션앵커 시공을 위해서는 먼저 설계 심도까지 앵커를 관입하는데 요구되는 부압 (underpressure)를 산정해야 한다. 요구되는 부압은 석션 앵커의 관입지지력 (penetration resistance)을 산정할때 사용되며, 전체 관입 지지력은 석션앵커의 무게와 요구되는 부압에 단면적을 곱한 힘의 합으로 나타낼 수 있다. 이렇게 산정

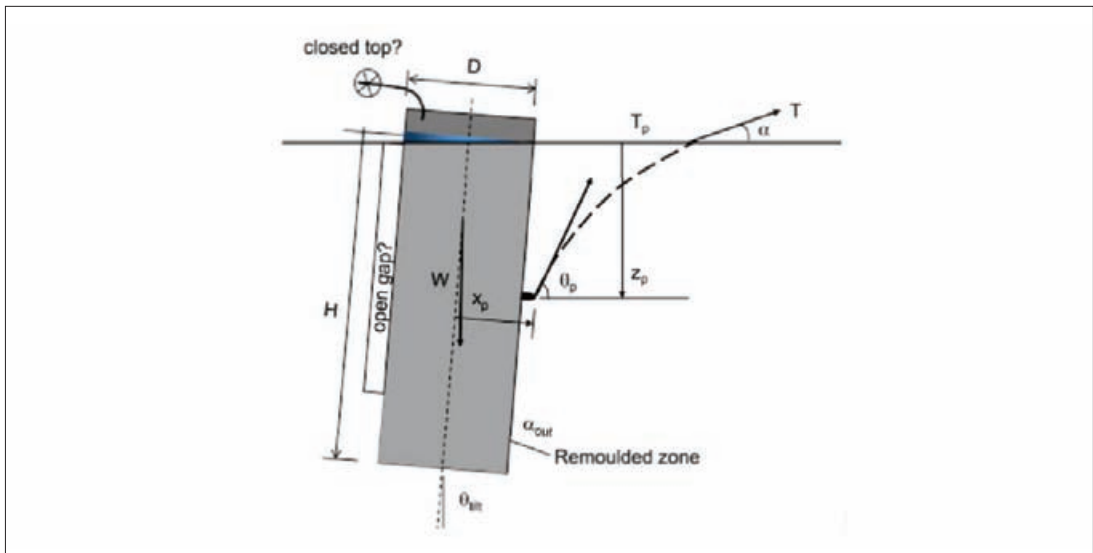


그림 4. 석션앵커의 주요 설계 parameter 및 고려사항 (H.P. Jostad, et.al., 2015)

한 요구되는 부압에 대해서는 버클링에 대한 구조적 안정성이 확보되어야 하며, 앵커 내부에서 발생할 수 있는 히빙 (heaving)에 대해 안전해야 한다. 석션 앵커 관입지력을 계산할 때는 앵커 내부에 stiffener에 대한 고려를 해야하며, 관입시 공동현상 (cavitation) 문제로 인하여 설치할 수 있는 심도가 제한될 수 있다.

굳은 점토지반에서는 버클링에 대한 구조적인 안정성은 설계시 주요 인자가 될 수 있으며, 다층 지반에서는 지반의 히빙이 문제될 수 있다. 모래층 위에 굳은 점토층이 있는 경우 앵커 내부 배수에 문제가 될 수가 있으며, 이는 앵커 선단에 water injection을 사용하여 문제를 해결 할 수 있다. 앵커 크기를 최적화 하기 위해서는 지지력 뿐만 아니라 시공시 제약조건을 고려한 구조검토도 동시에 수행하여야 한다.

(3) 설계 방법 : crack 발생 고려

그림 4와 같이 Mooring line을 연결하는 패드아이의 위치는 지지력 산정에 있어서 매우 중요한 요소이므로, 파괴모드와 앵커 배면에 발생 할 수 있는 크랙 여부에 따라 패드아이의 위치를 조정하여 설계를 수행하여야 한다.

최적화된 패드아이의 위치는 다음과 같이 설계할 수 있다. 먼저 앵커를 설계할 때는 배면 크랙 유무에 따라 패드아이 위치에 따른 안전율을 산정할 수 있다. 패드아이의 깊이를 점차 줄여가면서 크랙이 발생하지 않으면서 안전율이 최고인 지점을 찾아 낼 수 있다. 앵커를 디자인할 때는 패드아이 위치를 최적 지점보다 깊이 설계하여 현장 지반상태에 따라 관입심도가 알아지거나, 경사 및 mis-orientation 등 시공시 발생할 수 있는 불확실성에 대비하는 것이 중요하다.

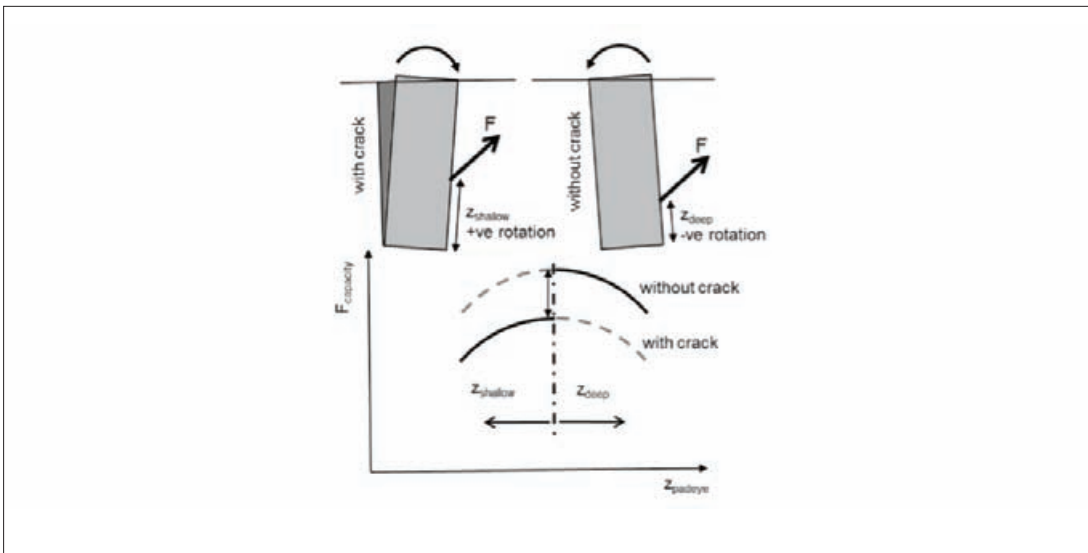


그림 5. 석션앵커 배면 크랙 발생을 고려한 패드아이 위치 최적 위치 선정 방안 (Y. Shin et. al., 2016)

4. 시공 및 모니터링 (Installation and Monitoring)

석션앵커의 시공시 계측관리 및 장기 모니터링은 구조물 시공 및 유지관리에 있어서 매우 중요한 요소이다.

석션파일 시공을 위한 장비는 말뚝 기초의 향타 시공 장비에 비하여 작은 규모의 해상장비가 필요하다. 석션파일 내부에 갇혀 있던 물이 밖으로 빠져나오면서 해저면에 발생하는 압력으로 석션파일이 관입되므로 최소한의 에너지가 필요하기 때문이다. 석션파일은 시공 후 별도의 재하시험을 수행하지 않으므로, 요구 지지력을 발현 시키기 위해서는 최대한 설계 조건에 맞추어 시공을 하는 것이 중요하다.

일반적으로 시공시 계측을 위해 고려해야 할 사항들은 다음과 같다.

- 최종 관입 깊이 (final penetration depth) : 일반적으로 석션파일의 높이는 최종관입심도 보다 깊어야 하며, 이는 시공시 발생하는 히빙을 고려해야 하기 때문이다.

- 위치 (position) : 허용오차범위 내

- 수직도 (verticality) : 하중 각도의 지반조건에 따라 차이가 있지만 일반적으로 허용 오차를 ± 10 도를 허용한다.

- 회전오차 (mis-orientation) : padeye 부분에 작용하는 bending stress에 따라 달라질 수 있지만 일반적으로 ± 10 도를 허용한다.

- 부압 (under pressure) : 앵커 내부의 압력을 체크하는 것은 매우 중요하다. 기록되는 내부압력을 앵커의 관입심도와 함께 기록하면서 지지력을 확인해야 한다. 시공 중 설계 심도에 도달하기 전에 부압이 커지게 되어 관입저항력이 높아지게 되면 지반 히빙과 석션앵커의 버클링에 대한 안전성을 확인해 가며 최종 관입 심도를 결정해야 한다. 이때 당초 설계시 요구되는 지지력이 확보되는지 확인하는 것이 중요하다.

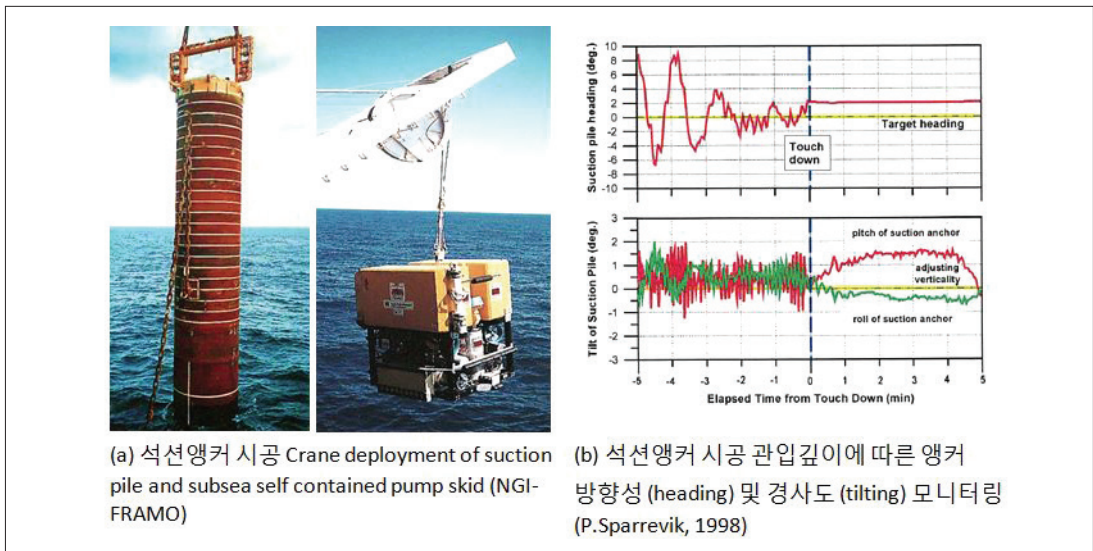


그림 6. 석션앵커 시공시 계측 및 모니터링 기술

그림 6(a)는 석션앵커 시공시 사용되는 크레인과 해상 펌프장비를 보여주고 있으며, 그림 6(b)는 석션 앵커 시공시 관입깊이에 따른 앵커의 방향성(heading) 및 기울기(tilting)에 대한 모니터링 결과를 나타내고 있다.

장기 모니터링은 구조물의 생애주기 동안 해양 환경 하중이 작용할 동안 구조-지반계 상호 반응을 보다 정확하기 이해하기 위해서 수행하는 것이며, 주로 간극수압계 (pore pressure), 변위계 (strain gauges), 가속도계(accelerometer), 경사계 (inclinometer), 파고측정 (wave radar) 및 압력계 (pressure sensor) 등을 설치할 수 있다. 일반적으로 설치 위치는 하부구조물 (자켓 구조물), 자켓과 석션파일의 연결지점, 석션 파일에 각종 계측기를 설치하게 되며, 경사계의 경우 주로 트랜지션 피스에 설치하게 되는데, 구조물의 종류, 계측 목적에 따라 장기 모니터링 계획을 사전에 적절히 수립하는 것이 중요하다.

5. 국내 적용성 (Application in Korea)

전 세계적으로 해양구조물 설치시 석션 앵커의 사용 범위가 넓어지고 있다. 해수면이 높은 지역에 부유식 구조물 (부유식 교량 및 부유식 터널) 등의 경우도 구조물의 거동을 제안시키기 위해 석션앵커를 사용할 수 있다. 또한 최근 추진 중인 서남해안 해상풍력 실증단지 해상풍력을 지지하는 하부 구조물 기초로 석션파일 사용이 검토중에 있다. 이미 군산 테스트 베드 지역에 3MW 해상풍력 구조물 기초로 석션 파일을 설계, 시공, 운영되고 있으며, 이후 서남해안 해상풍력 단지에 적용성을 확대할 것으로 예상하고 있다.

또한 해저 파이프라인 및 해저 케이블을 고정시키기 위한 구조물로도 석션앵커를 사용할 수 있다. 석션압력을 컨트롤하여 계측을 통한 시공관리를 수행할 수 있으며, 설치위치 및 관입심도를 조절하여 해저파이프라인 및 해저케이블을 안전하게 시공할 수 있다. (그림 7a)

석션앵커는 매우 연약한 해저지반에 HOST (Hinged Over System Template)을 설치할때 말뚝기초와 함께 사용하여 수평지지력을 향상시킬 수 있으며, 드릴 리그를 펌프 케이블로 사용하여 시공성을 향상시킬 수 있는 방법 등 다양한 적용 가능성이 예상되고 있다. (그림 7b)

그밖에 해상구조물 설치를 위한 잭업 바지 기초로 일반적으로 사용하고 있는 스퍼드캔 (spudcan) 기초 대신 석션 케이슨을 사용하여 관입 및 인발 시공성을 향상시키며, 안전성을 확보할 수 있는 방안이 연구, 적용되고 있는 등 석션앵커 사용성에 대한 다양한 방안이 활발히 연구 중에 있다. (그림 7c)



그림 7. 해상구조물에 석션 앵커 (석션 기초) 적용성 가능성

참고문헌

1. Andersen, K.H., Murff, J.D., Randolph, M.F., Clukey, E., Erbrich, C., Jostad, H.P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P. & Supachawarote, C. 2005. Suction anchors for deepwater applications. ISFOG 2005. Perth, Western Australia.
2. Jostad, H.P., Andersen, K.H., (2015), "Calculation of undrained holding capacity of suction anchors in clays", Frontiers in offshore geotechnics III, ISBN: 978-1-138-02848-7.
3. Norwegian Geotechnical Institute (1997), Njord Suction Anchors, "Verification of Holding Capacity", Contract report to Norsk Hydro, 962542-2, Rev. 1., 21 April 1997
4. Sparrevik, P., (1998), "Suction anchors - A Versatile foundation concept finding its place in the offshore market". OMAE 1998 in Lisbon
5. Shin, Y.S., Langford, T., Sordi, J.D., (2016), "Re-evaluation of suction anchor holding capacity based on back analysis of undrained shear strength", Proceedings of the ASME 2016 36rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2016 June 19-24, 2016, Busan, Korea.