

## Suction Pile 공법 개요 및 그 적용 Introduction of Suction Pile Technology

조 영기<sup>1)</sup>, 방상철<sup>2)</sup>, 박중배<sup>3)</sup>, 곽대진<sup>4)</sup>

- 1) 대우건설 Suction Pile 책임연구원, Principal Researcher of Suction Pile, Daewoo E&C Co., Ltd
- 2) 사우스 다코타 주립공대학장, Dean of South Dakota School of Mines and Technology, USA
- 3) 대우건설 차장, Senior Engineer, Daewoo E&C Co., Ltd
- 4) 대우건설 대리, Project Engineer, Daewoo E&C Co., Ltd

**SYNOPSIS:** The interest in suction piles by the oil industry was risen in the middle of 1980's. Recently, suction piles have been applied increasingly in offshore engineering due to its low cost, simplicity, efficiency, and reliability. Suction piles have normally been used as anchors of floating structures and foundations of marine structures in deep-water locations. Suction piles have several technical advantages over conventional piles and anchors; fast and easy installation at any depth of water, extremely large resistance due to its huge size, and easy retrieval by applying a positive suction pressure inside the pile, etc. Daewoo E&C Co., Ltd. has conducted a series of field suction pile installation and loading tests inside the Okpo harbor located in Geoje-do and the Onsan harbor in Ulsan, Korea, during the summer of 2001, which may provide additional validation of the analytical solutions previously developed by the US Naval Facilities Engineering Service Center. This is a brief description of the general mechanisms of suction pile installation and loading capacity based on the study conducted by the US Navy and Daewoo E&C Co., Ltd.

**Keywords:** Suction pile, Suction caisson, Pile loading capacity, Offshore structures

### 1. Introduction

Suction Pile 은 Suction 으로 인하여 발생된 압력차에 의해서 설치되는 파일을 말하는데, 보통 직경과 길이비가 1:2 을 넘지않고 그 크기가 직경 30m 이상인 것도 있다[17]. Suction Pile 은 Suction 을 가하기 용이하게 상단부는 밀폐되고 하단부가 열린 컵을 엮어놓은 모양을 하고 있다. Suction Pile 의 설치방법은 기 설명된 파일을 해저에 안착시킨후 파일두부에 설치된 펌프를 이용해서 물을 배수시킨다. 파일하부가 파일자중에 의하여 상대적으로 투수성이

낮은 해저면에 관입되어 있으므로 펌프에 의하여 배수된 물을 파일의외로부터 내부로 회복 시키는데 상당한 시간이 소요되게 되는데, 이는 파일 내부의 압력을 저하시키는 결과를 초래한다. 따라서 파일 내부와 외부의 압력차가 발생하게 되는데, 파일구조체는 수평방향으로는 힘이 평형을 이루나 상하 방향으로는 하부로 누르는 힘이 발생하게 된다. Suction 파일의 관입 유도력은 파일 외부와 내부의 압력차와 파일 단면적의 곱에 비례하므로 직경이 큰 파일은 적은 압력차라고 해도 큰 관입유도력이 발생하게 된다. 따라서 직경이 큰 파일이 상대적으로 시공하기 쉽다고 할 수도 있다. 왜냐하면 유도관입력은 파일 직경의 제곱에 비례하는 반면, 파일의 관입을 방해하는 지반의 저항력은 파일 직경에 비례하기 때문이다. Suction Pile 은 다른 기존 파일과 달리 관입의 반대개념 즉 물을 파일내부로 주입함으로써 쉽게 인발할 수가 있다. 따라서 필요하다면 뽑아서 이동하여 다른 지점에 재시공할 수 있어서 한번 만들어진 파일 구조물을 반복해서 사용할 수 있다. Suction Pile 은 주로 Steel 이나 콘크리트로 제작되지만 복합소재, 목재 등 가능한 모든 재료로 제작될 수도 있다.

Suction Pile 은 1980 년대에 북유럽 특히 노르웨이에서 심해저 석유 채취용 Platform 의 기초로 사용되었으며, 그 이후에도 같은 목적으로 남아프리카 공화국, 호주, 브라질 등 극히 일부 국가에서 시공되었다 [17]. 예로써, 노르웨이에서 시공된 Suction Pile 은 직경이 32m, 길이가 37m 로 수심 약 300m 깊이에 설치되어 석유시추 Platform(Golfaks C Gravity Platform)을 받히는 거대한 4 개의 Concrete 기둥의 기초로 이용되었다. 그렇지만, 이들 시공은 대부분 경험에 의존하여 설계되었고, Suction Pile 의 기술개발이 본격적으로 시작된 것은 전 세계적으로 불과 10 년도 지나지 않는다. 즉 아직까지도 기술개발의 측면에서는 초기단계에 머물고 있다 하겠다.

㈜대우건설이 본 공법과 인연을 맺어 연구를 시작한 것은 1997 년부터이다. 당시 미국 해군이 차세대 방어진략으로 MOB (Mobile Offshore Base) 연구프로젝트를 시작할 무렵이었다. 이해를 돕기 위하여 MOB 를 간략하게 소개하면, 미국은 한국, 일본, 독일 등에 있는 군사기지를 향후 더 이상 사용하지 못할 것을 대비하여 공해상에 떠있는 부유식 해상기지를 구축하는 것을 계획하였는데, 이 거대한 부유식 구조물이 MOB 로 명명되었다 [1, 5, 6, 10]. MOB 는 항공모함과 비슷한 개념으로 이해하면 될 것이다. MOB 는 길이가 약 1.6km 이고 폭이 180m 로 세 개의 Module 로 이루어진 Semi-Submersible 구조체로써, 이는 기존 항공모함 크기의 16 배에 달하며, 5000 여명의 여단 병력이 항시 상주하면서 작전을 수행할 수 있다. 또한, 작전중에는 자체 추진장치로 이동도 가능하다. 평상시에 이 거대 구조물 MOB 를 정박하기 위한 Mooring 시스템이 필요한데, 한국이 낳은 세계적인 토목기술자인 방상철 박사(현재 미국 사우스 다코타 주립공대 학장)가 제안한 Suction Pile Mooring System 이 채택되었다. 그 이유는 Suction Pile 이 Drag Anchor 와 같은 기존 Anchor 들에 비하여 수천 또는 수만 배의 인발 저항력을 가지고 있고, 또한 쉽게 뽑아서 이동도 용이하여 MOB Mooring System 의 요구조건을 가장 잘 만족시키기 때문이다. 당시 ㈜대우건설의 과장으로 재직중이던 조영기 박사는 도미하여 이 프로젝트의 팀장으로 방상철 박사와 함께 Suction Pile 에 관련된 이론 개발에 전력하였다. Suction Pile 에 대한 연구는 지난 4 년간 이론과 시험을 병행하여 이

루어졌으며, 현재 미국 해군에서 실용화 단계에 있다. 한국에서는 지난 1999년부터 2000년 사이에 대우건설연구소에서 미국 해군의 Suction Pile 연구개발 프로젝트의 일부인 Centrifuge 모델 시험용역을 수주 받아 성공적으로 수행하였다 [3]. 우리가 개발한 기술의 특징은 미국 해군의 특성상 세계 어느 지역에서도 시공이 가능한 설계방법을 만들어야 하기 때문에 역학에 근거한 가장 일반적인 설계방법을 도출하였다는데 있다 하겠다[1, 5, 6, 10]. 또한 일반 해상 구조물의 기초나 Anchor System에 응용할 수 있도록 확장한데도 그 의의가 있다.

(주)대우건설은 지난 2001년 7월부터 9월까지 국내최초로 대대적인 Suction Pile 기술개발 계획을 수립하여 점토지반으로 구성된 옥포항과 모래지반으로 구성된 온산항에서 현장시험을 성공적으로 수행했으며, 현장 시공과 관련된 많은 핵심적인 기술들을 개발했다. 세계적으로도 이처럼 Suction Pile에 대한 대대적이고 정밀한 현장시험시공을 한 것은 처음인 것으로 알고 있다. 시연회에 참석한 교수들을 비롯한 수많은 국내 전문가들이 본 공법의 잠재성을 확인하였으며, 현재 특허 및 신기술 등록을 추진중에 있다.

본 공법의 적용범위는 방파제, 해상공항, 해상신도시 건설 등 그 적용 범위가 무궁무진하며, 기존 매립공법에 비하여 획기적으로 공기 및 공사비가 절감될 것으로 기대된다. 또한, 설치도중 소음이나 진동이 전혀 없으며, 거대파일시공법의 개발로 환경파괴가 거의 없는 환경 친화적인 구조물의 창출이 가능해 졌다.

## 2. Suction Pile Installation and Retrieval

Suction Pile 설치방법은 Suction Pile을 설치하고자 하는 위치에 파일을 안착시킨후 파일 두부에 설치된 펌프로 파일 내부의 물을 배출함으로써 파일 내부의 압력을 저하시켜 파일을 관입시킨다 (그림-1). 파일의 Retrieval 방법은 설치와 반대개념으로 물을 파일 내부로 주입함으로써 파일의 내부에 발생한 양압력으로 인한 거대한 인발력으로 파일을 뽑아올리게 된다. Suction Pile의 설치에서 중요한 인자로는 펌프, 파일 내부와 외부의 압력차, 물의 유입 및 파일 관입으로 인한 지반의 교란, Sand Boiling, Clay Column Plugging 등이 있다 [7, 8, 9, 11, 12, 13]. 이중 파일내부와 외부의 압력차가 가장 중요한 설치설계 요소인데, 안전한 파일 관입을 위하여 요구되는 압력차는 두 가지 요소에 의하여 지배된다. 첫째로 압력차가 작아서 관입 유도력이 너무 작으면, 파일의 유도력이 지반의 저항력을 극복하지 못하여 파일의 관입이 불가능하게 된다. 파일이 지반의 저항력을 극복하여 관입하는데 필요한 최소한의 압력차를 Lower Bound라고 한다. 둘째로 압력차가 너무 크면, 모래의 경우에는 파일 외부로부터 내부로 유입되는 물의 흐름에 의하여 발생하는 큰 Uplift Seepage Force에 의하여 Boiling이 발생하고, 점토의 경우는 파일내부 전체의 점토 Column이 파일 하단부에서 절단(Soil Tension Failure)되어 밀려 올라오게 되는데 이를 Clay Column Plugging이라 부른다. 어떤 경우든 파일 내부가 토사로 가득차게 되므로 더 이상의 파일 관입이 불가능해지고 결국 완전한 파일 설

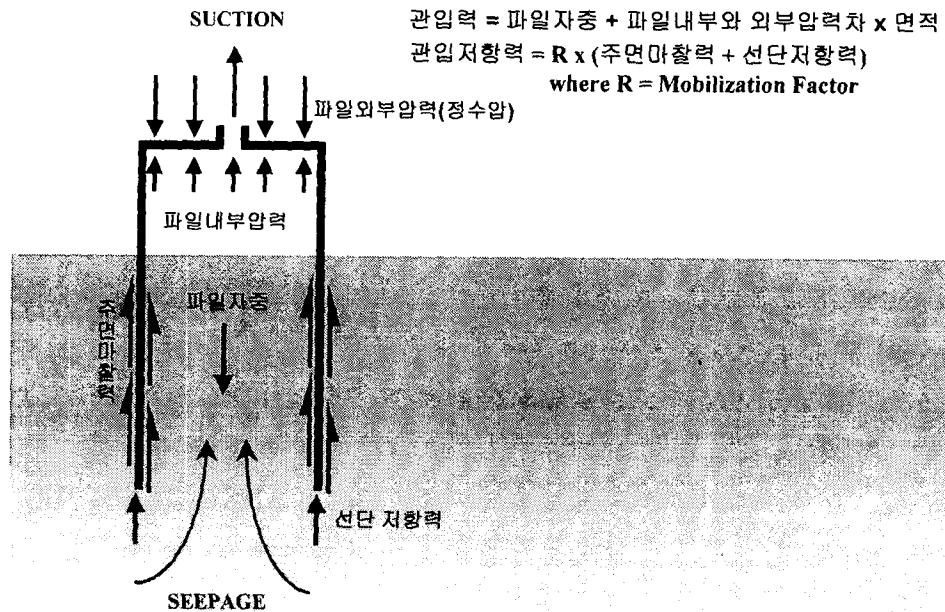


그림-1. Suction Pile 설치원리

치에 실패하게 된다. 이에 해당하는 압력차를 Upper Bound 라고 부른다. 따라서 설계 압력차는 주어진 관입 깊이에서 Upper Bound 와 Lower Bound 의 사이의 어떤 값이 된다 (그림-2). 설치도중 관입 깊이에 따라서 가할 수 있는 설계압력이 지반 지지력, 투수여건변화 등에 따라서 연속적으로 변화하므로 Closed-Loop System 으로 파일 내부와 외부의 압력차, 즉 펌프로 배출되는 유량을 자동으로 조절하는 것이 필요하다.

그림-3, 4 은 실제로 (주)대우건설에서 2001년 7월부터 9월까지 시행한 현장시험 사진인데, 시험에서 설치된 파일은 총 7 가지 종류의 파일로 콘크리트 파일은 내경이 각각 0.7, 1.2, 1.7m 이고 길이가 4.0m 이며, Steel Pile 은 내경이 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.5m 이고 길이가 5.0m 이다. 이는 파일의 Size Effect 를 시험을 통해서 확인하고, 또한 시험시공 특성상 반복적인 시험에 적합한 크기의 파일이 선택된 것이다. 실제 시공용 파일은 필요에 따라서는 직경이 50m, 길이가 100m 이상이 될 수도 있다. 시험시공은 점토 지반인 옥포항과 모래 지반인 온산항에서 이루어 졌는데, 설치 시험 및 Retrieval 시험은 성공적으로 완료되었다.

### 3. Estimation of Suction Pile Loading Capacity

Suction Pile 의 지지력은 사용목적에 따라서 여러 가지 형태로 표현될 수 있다. Suction Pile 이 기초로 이용될 경우에는 압축 지지력이 중요하지만, 해양에서는 점토지반의 추가적인 하중에 의한 침하 문제의 근본적인 해결을 위하여 부력을 이용하여 구조물의 총하중을

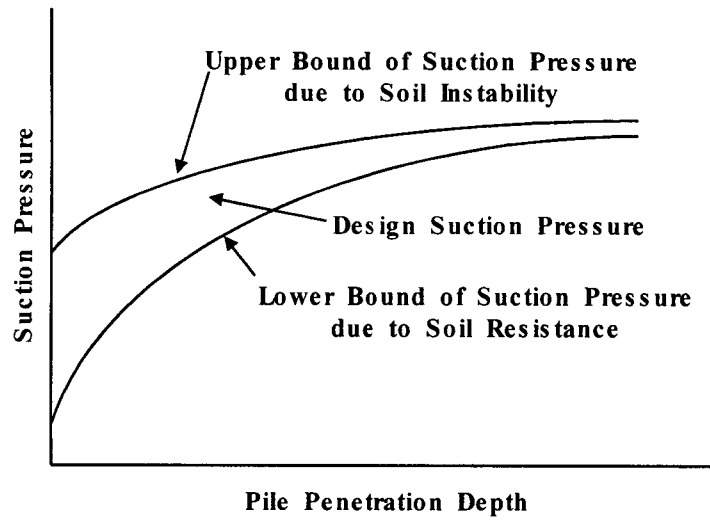


그림-2. Suction Pressure Control



그림-3. (주)대우건설 Suction Pile 현장시험사진

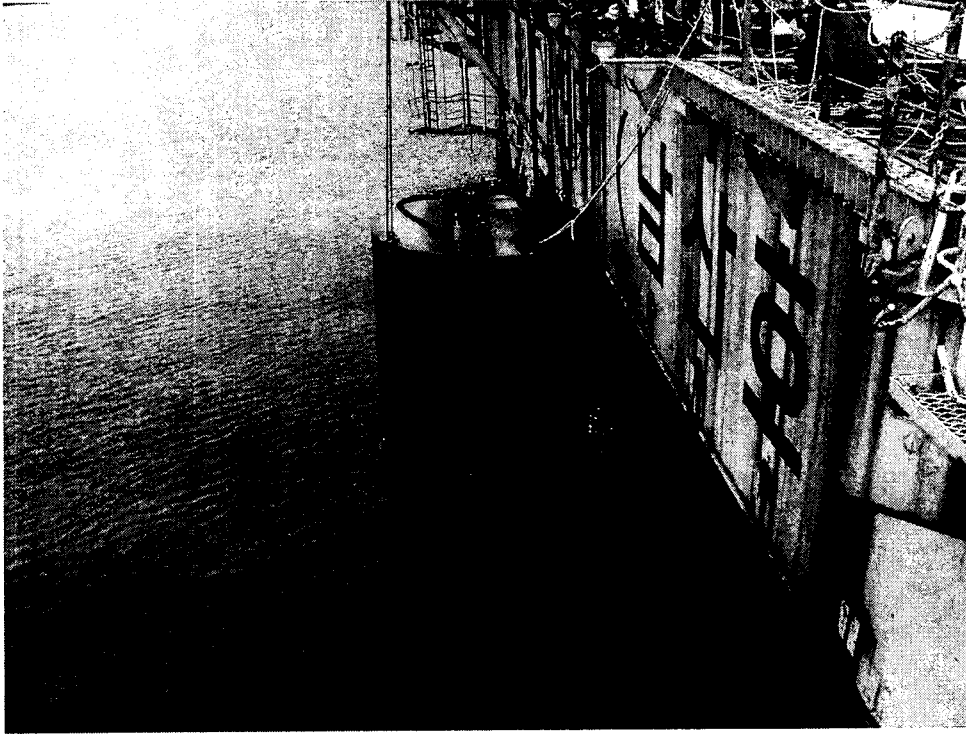


그림-4. (주)대우건설 Suction Pile 현장설치시험

최소화하고, 구조물의 자중 대신에 Anchor 로 구조물을 고정시켜 안정시킨다. 이 경우 Suction Pile 이 비록 구조물의 기초로 사용되었지만, 주요 역할은 수평방향의 하중(주로 Wave Action 에 의한)에 저항하게 되므로 수평방향 지지력이 중요한 요소가 된다. 반면에 Suction Pile 이 Anchor 로 사용될 경우에는 Mooring Line 을 통해서 하중이 임의의 방향으로 가해질 수 있고, 또한 Suction Pile 의 지지력을 향상시키기 위하여 Mooring Line 을 파일의 어떤 위치에도 연결할 수 있으므로 이를 고려한 지지력 산정이 필요하다.

Suction Pile 의 연직 하중은 압축과 인발 하중이 있는데, 간략하게 그 Mechanism 을 설명하면 다음과 같다. 압축 하중을 받는 Suction Pile 은 그 모양의 특성 즉 파일 상부가 밀폐되고 하부가 Open 되어 있어서 파일이 지반으로 완전히 관입하게 되면, 파일 내부가 기존 토사로 완전히 꽉 차게 된다 [4]. 따라서 수직 하중을 받는 Suction Pile 의 지지력은 파일 외부 마찰력과 파일 전체 단면에 대한 End Bearing 에 의하여 결정된다 (그림-5). 반면에 파일 인발에 대한 파괴 양상은 크게 2 가지 Mode 가 있다. 파일이 상대적으로 직경에 비하여 길이가 짧고 하중이 천천히 가해질 경우에는 파일몸체 자체만 빠져 올라오게 되는데 이 경우에는 지지력은 파일 자중과 파일 내부 및 외부의 마찰력에 의하여 결정된다. 반면에 파일의 길이가 상대적으로 직경에 비하여 크고 하중이 빠르게 가해질 경우에는 파일 내부의 토사가 파일과 함께 일체로 떨어져 올라오게 되는데, 이 경우의 저항력은 파일 외부 마찰각과 파일 하부의 인장저항력 그리고 파일자중 및 파일 내부의 토사의 무게에 의하여 결정된다

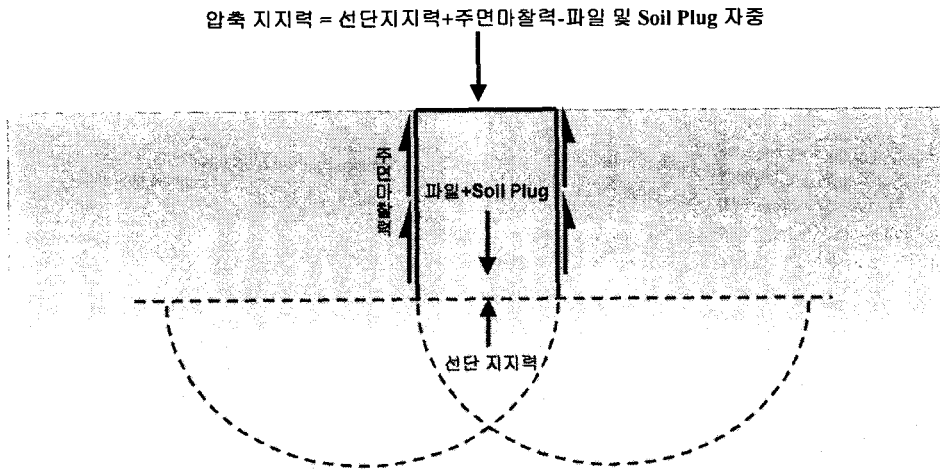


그림-5. Suction Pile 압축 지지력

(그림-6).

파일의 수평방향 지지력 산정에서 중요하게 고려해야 할 사항은 첫째로 파일의 모양특성상 3 차원을 고려하여야 하고, 즉 3 차원 Failure Wedge 에 기초한 Governing Equation 을 사용해야 한다 [2, 14, 15, 16]. 둘째로 수평하중을 받는 파일의 회전 및 전이에 따라서 파일 주위의 토사가 탄성(Elastic) 상태에서 소성(Plastic) 상태로 연속적으로 변하므로 이를 고려하여야 한다. 즉 Progressive Failure 개념을 도입하여야만 보다 정확한 해를 얻을 수 있다 (그림-7). 주어진 하중점에 대한 지지력은 복잡한 알고리즘을 가진 Computer Program 을 통해서 구해질 수 있으므로 상세한 과정을 설명하는 것은 논외하기로 한다. 여기에서 일부 분석결과만을 간략하게 소개하면, 최대 지지력에 대응하는 하중점은 파일의 중간깊이보다 조금 하단부에 위치한다. 따라서 Suction Pile 이 수평하중을 받는 경우에는 하중을 최대 지지력 점에 위치시키는 것이 유리하다.

Suction Pile 의 주어진 하중점에 대한 임의 방향의 극한 지지력의 일반해를 이론적으로 찾는 것은 현실적으로 어쩌면 불가능할지도 모르고 가능하다고 하더라도 너무 많은 시간과 노력이 요구될 것이다. 따라서 임의의 조건에 대한 지지력은 엄격한 이론해를 구하는 대신에 앞에서 설명한 주어진 하중점에 대한 수직 및 수평 방향의 극한 지지력의 이론해와 시험을 통하여 얻어진 파괴 포락선(Failure Envelop)으로부터 보다 손쉽게 산정될 수 있다 (그림-8) [14, 15, 16]. 그림-9, 10 은 ㈜대우건설이 현장에서 Suction Pile 에 대한 압축 및 인발 하중시험을 하는 전경이다.

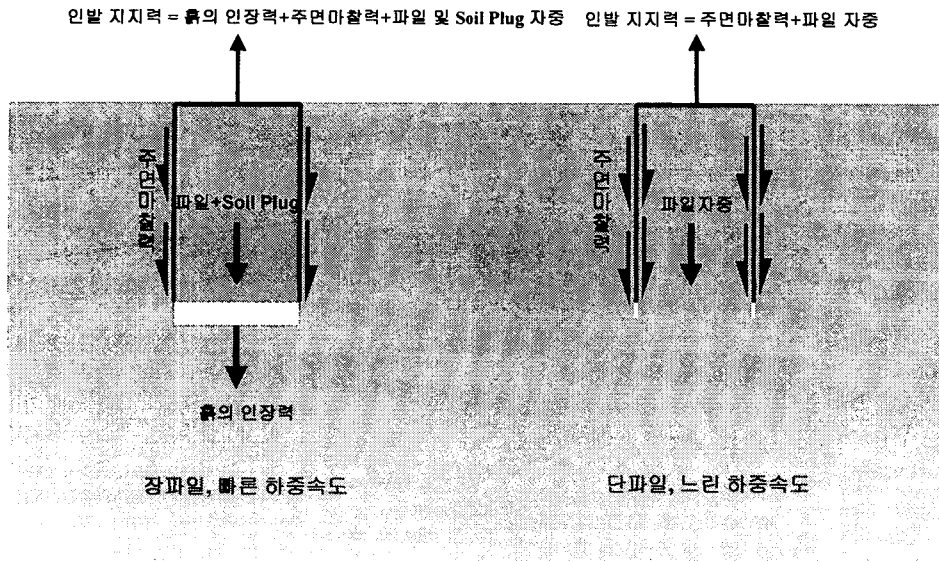


그림-6. Suction Pile 인발 지지력

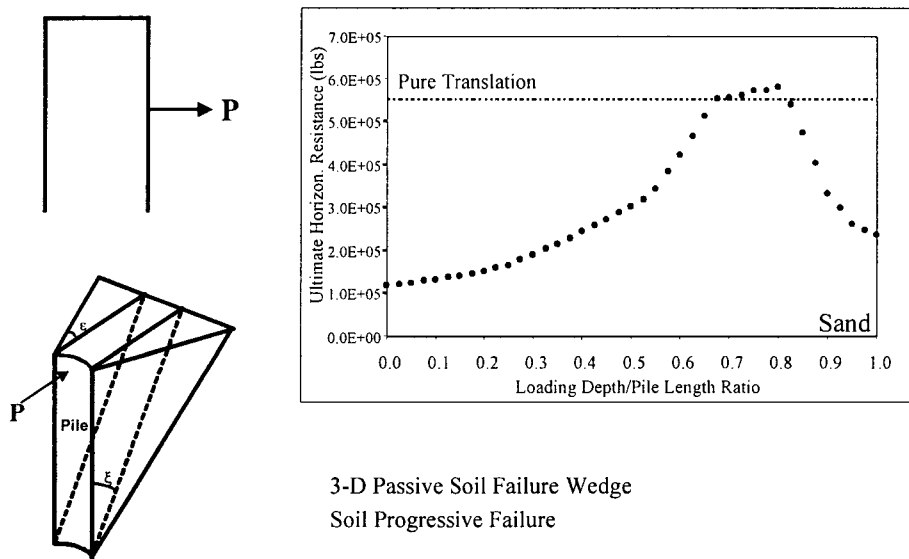


그림-7. Suction Pile 수평 지지력



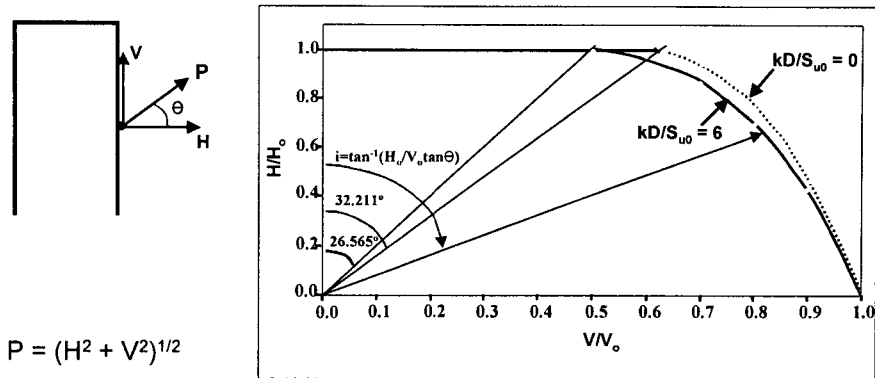


그림-8. Suction Pile 지지력 일반해

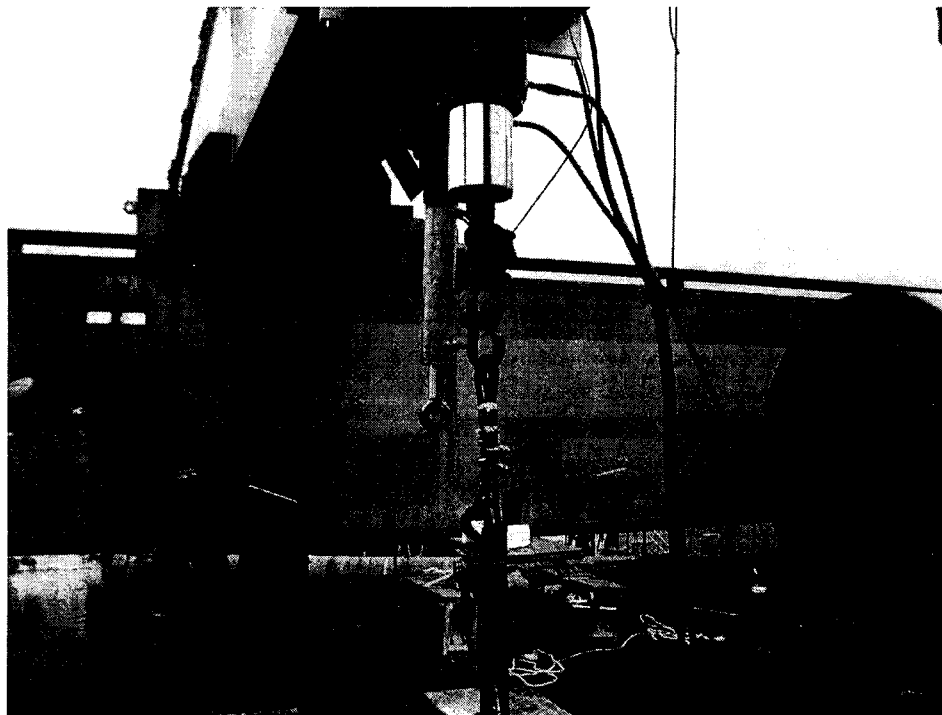


그림-9. (주)대우건설 현장 파일 인발시험 장면

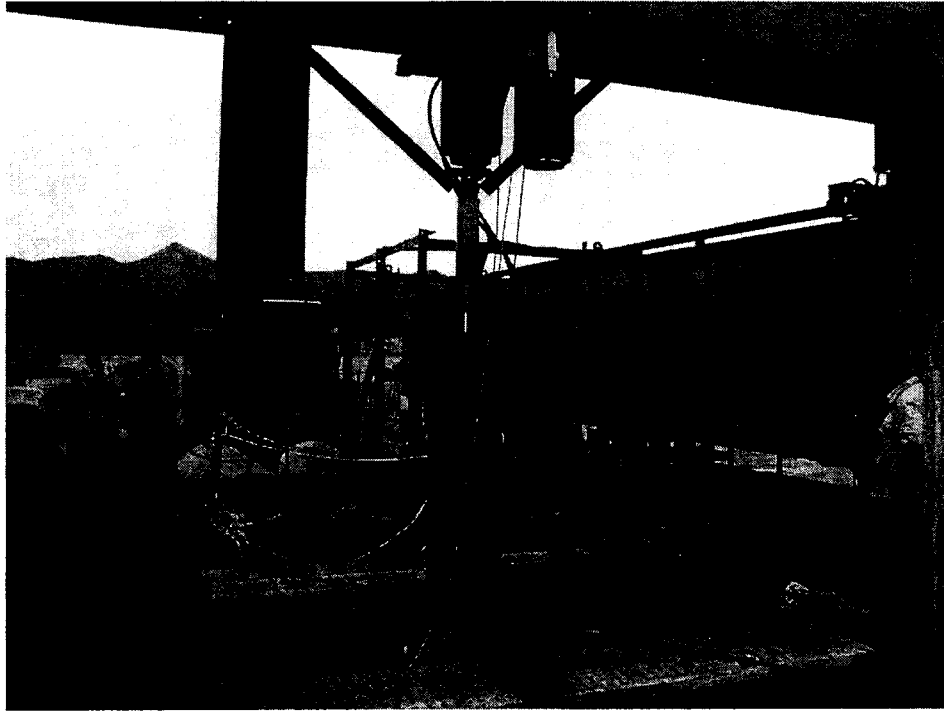


그림-10. (주)대우건설 현장 파일 압축시험 장면

#### 4. Applications of Suction Pile Technology

Suction Pile 이 석유산업 및 건설산업에 소개됨으로써 우리가 찾을 수 있는 의의는 여러 가지가 있겠지만, 가장 큰 의의는 압력을 이용하여 파일을 설치하는 시공의 독특성으로 거대 파일을 수심에 상관없이 설치할 수 있기 때문에 이 거대 파일이 지금까지 해상 구조물의 가장 큰 숙제 중 하나인 Reference Point 를 공급해 줄 수 있는데 있다. 다시 설명하면, 부유식 거대 구조물의 위치를 명확하게 확정할 수 있는 Anchor System 을 제공하고, 방파제, 해상 신도시 및 공항 등과 같은 구조물이 주로 사석매립을 통해서 성취되어 왔던 해상에서의 Reference Point 를 Suction Pile 이 대신해줄 수 있다. 예를 들면, 사석 매립형 Caisson 식 방파제 대신에, Suction Pile 위에 콘크리트 기둥으로 연결된 박스 형태의 방파제를 만들 수 있다. 이 박스형 방파제는 바닷물이 박스형 방파제 하부 즉 콘크리트 기둥 사이로 자유롭게 이동할 수 있어 환경영향을 최소화할 수 있고, 당연히 공기의 단축 및 공사비가 절감될 것이다. 수심과 연약 점토층이 깊을수록 공기 및 공사비가 기존 매립형 방파제에 비하여 상대적으로 크게 줄어들 것이다. 기존 사석 매립형 Caisson 식 방파제는 현실적으로 사석의 침하량을 정확하게 예상하기 어렵기 때문에 시공전후에 여러 가지 문제점을 야기시켜 왔다. 반면에 Suction Pile 을 이용한 방파제는 부력으로 전체 하중을 조절하고 거대한 Suction Pile Anchor 로

고정하기 때문에 침하 문제가 전혀 발생하지 않게 설계할 수 있다. 전체 하중을 조절하고 거대한 Suction Pile Anchor 로 고정하기 때문에 침하 문제가 전혀 발생하지 않게 설계할 수 있다. 같은 개념으로 일본 간사이 국제 공항이 매년 심각한 매립 인공섬의 침하 문제로 골치를 앓고 있는데, Suction Pile 을 이용하여 해상 공항이나 신도시를 건설하면, 그런 문제가 쉽게 해결될 수 있다는 것은 상상이 갈 것이다. 그 밖에도 해상 항만, 조선소, 발전소, 모래 유실 방지시설, 조력발전시설 등 그 적용 범위가 무궁무진하다. 결론적으로 Suction Pile 로 인하여 기존 해상 구조물들과 같은 기능을 수행하는 개념이 전혀 다른 환경 친화적인 구조물의 창출이 가능해졌다 하겠다.

현재로서는 우리의 기술이 특히 이론적인 부분에서는 세계의 다른 경쟁자들보다 앞서 있다고 판단되나 지속적인 투자와 정부 및 학계의 도움이 없다면, 곧 일본 등과 같은 후발 경쟁자들에게 주도권을 빼앗길 것은 자명하다. 따라서 가능한 짧은 시간 내에 국내에서 Suction Pile 을 이용한 신개념의 해양구조물의 건설이 절실히 필요하다.

## References

1. 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.
2. Bang, S. and Cho, Y., "Ultimate Horizontal Loading Capacity of Suction Piles," *11<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition*, Stavanger, Norway, June, 2001.
3. Bang, S., Cho, Y., and Kim, S., "Calibration of Suction Pile Installation Design with Centrifuge Model Tests," *20<sup>th</sup> International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, OMAE-01-5023, Rio de Janeiro, Brazil, June, 2001.
4. Bang, S. and Cho, Y., "Ultimate Vertical Loading Capacity of Suction Piles," *36<sup>th</sup> Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*, Las Vegas, Nevada, USA, Mar., 2001.
5. Bang, S. and Cho, Y. (2000), "Use of Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases - Task 4 Completion Report: *Analysis and Design Methods of Suction Piles*," US Naval Facilities Engineering Service Center, USA.
6. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Gisi, B., Hodges, D., Boyle, S., Gould, J., and Park, K. (2000), "Use of Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases - Task 3 Completion Report: *Experimental Laboratory and Field Model Tests of Suction Piles*," US Naval Facilities Engineering Service Center, USA.
7. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S.R., and Taylor, R.J., "Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases," *Journal of Marine Structures*, no. 13, pp. 367-382, UK, 2000.
8. Preber, T., Bang, S., Cho, Y., Boyle, S., and Gould, J., "Calibration of Suction Pile Installation Analysis in Sand," *53<sup>rd</sup> Canadian Geotechnical Conference*, pp. 901-908, Montreal, Canada, Oct., 2000.

9. Bang, S., Cho, Y., Kanorski, S., and Taylor, R., "Field Verification of Suction Pile Installation in Sand," *International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, pp. 249-254, Yokohama, Japan, Sep., 2000.
10. Bang, S. and Cho, Y. (1999), "Use of Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases - Task 2 Completion Report: *Analytical Performance Study*," US Naval Facilities Engineering Service Center, USA.
11. Bang, S., Preber, T., Thomason, J., and Cho, Y., "Laboratory Model Testing on Suction Pile Installation in Clay for Mooring of Mobile Offshore Bases," *52<sup>nd</sup> Canadian Geotechnical Conference*, pp. 119-126, Regina, Saskatchewan, Canada, Oct., 1999.
12. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S., and Taylor, R., "Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases," *3<sup>rd</sup> International Workshop on Very Large Floating Structures*, Vol. 2, pp. 670-678, Honolulu, Hawaii, USA, Sep., 1999.
13. Bang, S., Cho, Y., Preber, T., and Thomason, J., "Model Testing and Calibration of Suction Pile Installation in Sand," *11<sup>th</sup> ARC, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. I, pp. 253-256, Seoul, Korea, Aug., 1999.
14. Bang, S. and Cho, Y., "Analytical Parametric Study of Suction Piles," *18<sup>th</sup> International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, St. John, New Foundland, Canada, July, 1999.
15. Bang, S. and Cho, Y., "Analytical Performance Study of Suction Piles in Sand," *9<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition*, Vol. I, pp. 90-93, Brest, France, May, 1999.
16. Bang, S. and Cho, Y., "Analytical Performance Study of Suction Piles in Clay," *34<sup>th</sup> Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*, pp. 232-244, Logan, Utah, USA, Apr., 1999.
17. Tjelta, T.I., Aas, P.M., Hermstad, J., and Naes, E., 1990, "The Skirt Piled Gulfaks C Platform Installation," *Proceedings of 22nd Offshore Technology Conf.*, Texas, Paper No. OTC 6473.