

해상 자켓 구조물 파일 모니터링 현장 사례 Pile Moniotring for Offshore Jacket Structures ; Field Study

김대학¹⁾, Dae-Hak Kim, 이규환²⁾, Kyu-Hwan Lee, 박찬덕³⁾, Chan-Duck Park,
문상욱⁴⁾, Sang-Wook Moon, 김학중⁵⁾, Hak-Jung Kim

- 1) 유니콘기술연구소 대표, President, Unicorn Technical Institute, UTI
2) 건양대학교 토목공학과 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Konyang University
3) 대우엔지니어링 상무이사, Standing Director, Daewoo Engineering Company
4) 유니콘기술연구소 기술부차장, Deputy Manager, Unicorn Technical Institute, UTI
5) 현대중공업 해양설치공사부 부장, Manager, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., HHI

SYNOPSIS : This research discussed about method for basis construction of sea jacket construction. Several access ways of method for foundation construction of sea jacket construction are used. Accompany many efforts of design and build process to overcome the form of construction work and application equipment, special quality of construction and restriction and so on of sea environment in the case of pile foundation. Therefore, great many factor of sea condition, construction special quality, base condition, construction time, equipment composition, worker composition etc. shows other work form in spot at sea jacket construction process.

Key words : Pile monitoring, Offshore, Jacket structure, Offshore jacket

1. 서 론

해상 자켓 구조물의 기초 건설을 위한 방법은 여러 접근 방식이 사용되고 있다. 말뚝 기초의 경우에 그 시공 방법 및 적용 장비, 구조물의 특성과 해양환경의 제약 등을 극복하기 위한 설계 시공 과정의 많은 노력을 수반하게 된다. 따라서 해상 자켓 구조물 시공 공정에서 현장마다 해상 조건, 구조물 특성, 지반 조건, 시공 시기, 장비 구성, 작업자 구성 등의 수많은 요인이 다른 작업 형태를 보여준다. 해상 자켓 설치에 있어 이어도 해양 과학 기지 및 동해 가스 생산 시설과 인도 가스전 생산시설 시공사례 비교하여, 자켓 진수 방법, 말뚝 인양 방법, 항타 방법, 파일 모니터링 및 그 시공 결과를 비교 하고자 한다. 특히 육상에서 접할 수 없는 대형 작업선, 대구경 항타 장비, 무인 잠수정 및 수중 항타, 수중 파일 모니터링 등의 특성을 나타내고자 한다.

2. 자켓 구조물 설치 목적 및 위치

해상 자켓구조물은 그 상부 구조물의 목적에 따라 다양한 형태의 구조물이 제작 설치되고 있다. 본 논문에서 논의된 3가지 경우의 해상자켓 구조물의 설치 목적도 과학 관측 목적, 생산 설비등의 목적 외에 국제적인 시설물 인근 500m에 대한 시설 보호 영역 인정 및 국제 표기 등의 영향을 나타내고 있다.

표 1. 자켓구조물 설치 관련 이력

시설구분	이어도 종합해양과학기지	동해-1 가스 생산시설	인도 천연가스전 (MSP-Platform)
주요 이력	<ul style="list-style-type: none"> 1900년 영국상선 Socotra호 발견 (Socotra Rock 명명) 1910년 영해군 측량선 수심 측량 (Water Witch호 수심 5.4m) 1938년 일본 해저전선 중계시설 및 등대 설치 계획(태평양전쟁 발발로 무산 됨.) 1951년 한국산악회 해군 동판수침 '대한민국 영토 이어도' 1987년 해운항만청 이어도 등부포 설치 1995년 현장 해양조사 1998년 지반 보링 및 CPT 조사 2002년 자켓구조물 설치 2003년 헬리데크등 설치 및 종합 해양과학기지 시운전 	<ul style="list-style-type: none"> 1998년 6-1광구 고래V 구조 탐사 시추 결과 가스 발견 1998~1999년 평가 시추(3공) 개발타당성 확인 2004년 자켓설치 및 가스 생산 시설 준공 	<ul style="list-style-type: none"> 1980년 상업적인 천연가스 생산 설비 설치 인근 해역 250여개의 가스 관련 자켓구조물 운전 중(그림 3 참조) 2004~2005년 노후된 Flare 제거 및 Platfrom 및 Flare 추가 설치
주요설비	기상 관측, 환경 관측, 해양 관측 관련 장비 및 접안시설 헬리데크	가스생산 설비 및 기상관측장비, 접안시설, 헬리데크, 크레인등	가스생산 설비(50여개의 가스 관로) 및 접안시설, 헬리데크, 크레인등

2.1 이어도 종합해양과학기지

이어도는 앞으로 주변국들과 배타적 경제수역(EEZ) 확정 시 중간선 원칙에 따라 한국 측 해양 관할권에 있게 된다. 이어도의 가장 얕은 곳은 해수면 밑 약 4.6미터까지 돌출해 있으며, 수심 40미터를 기준으로 할 경우 남북으로 약 600미터, 동서로 약 750미터로, 면적이 약 11만 5천평에 이른다. 정상부를 기준으로 남쪽과 동쪽은 급경사를, 북쪽과 서쪽은 비교적 완만한 경사를 이루고 있다. 이어도 종합해양과학기지는 그림 1과 같이 마라도 서남쪽 152km 지점, 수심 40m 위치에 설치되었다.

2.2 동해-1 가스 생산시설

동해-1 가스전은 일일 평균 LNG 환산 1000톤의 천연 가스를 약 15년간 생산하여 발전소 및 도시가스용으로 공급할 수 있게 되었다. 동해-1 가스 해상플랫홈 Jacket 설치 위치는 한국석유공사(KNOC) 울산지사 운영부두 동쪽 해상에서 약 58km 지점에 위치하며, 설치지점의 수심은 약 152m이다. 플랫홈 지역의 해저지형은 동쪽에는 지형적으로 웜푹파인 트리프 지역이 발달하고 있으며 트리프는 수심 약 145~185m에 위치한다.

2.3 인도 가스전 생산 시설 (MSP Platform)

인도 대륙 서쪽 아라비아 해상에서는 풍부한 천연 가스 자원을 나타내고 있으며, 인도 내 에너지 소요의 약 50%를 충당하고 있다. 1980년 처음 상업적인 천연 가스 생산 설비가 설치된 해상 자켓 구조물들이 설치되어 있으며, 수명을 다한 구조물의 제거, 재설치 등의 작업이 진행되고 있다. 인도 서남서 160km 지점에 가스관로가 집중되는 지역에서 노후 설비 교체 및 추가 시설 설치가 이루어졌다. MHS (Mumbai High South) 지역은 인도 서남서 약 160Km 해상의 천연가스 생산지역으로 1980년에 처음으

로 상업적인 설비가 도입되어 현재 활발하게 천연가스가 생산되고 있는 지역이다. 본 현장은 ONGC(Oil and Natural Gas Corporation Ltd.)에서 노후된 해상구조물의 제거하고, 재설치 및 추가 구조물 설치 공정으로, 적용된 해상플랫폼 Jacket 및 Flare Tripod의 설치지점의 평균 수심은 약 76m이다. 플랫폼 지역의 해저지형은 수심 약 71 ~ 78m로 매우 복잡한 해저지형이 발달하였다. 한편 이곳의 가스전 개발 상황은 활발하여, 본 MHP(Mumbai High South Process) 설치지점에 인접하여 50여개 직경 10~20인치 가스 관로가 집중되는 가스 생산 주요 시설 지역이다.

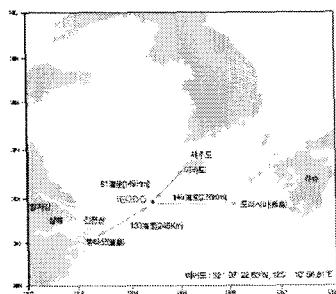


그림 1. 이어도 종합해양과학기지 설치 위치도

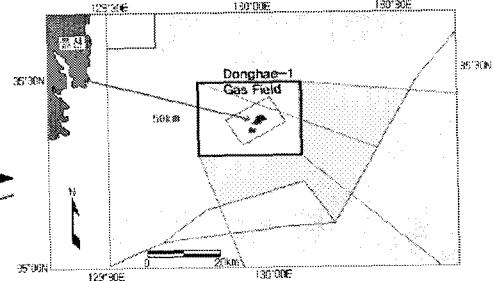
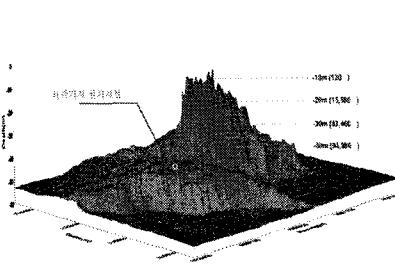


그림 2. 동해-1 가스 생산시설 설치 위치도

3. 말뚝구분

3.1 이어도 종합해양과학기지

이어도 종합해양과학기지 자켓구조물은 대구경 강관말뚝에 의해 지지되는 말뚝기초 형식으로 설계되었다. 말뚝은 4개의 주말뚝($\phi 60''$) 및 4개의 보조말뚝($\phi 72''$)으로 구성되어 있으며, 주말뚝과 보조말뚝의 특성치는 표 2와 같다. 주말뚝은 직경 $60'' (= 1524 \text{ mm})$ 에 두께가 32mm, 38mm, 44mm인 3개의 변단면으로 구성되어 있어 각각 P1, P2, P3 말뚝으로 구분되며(그림 4. 참조), 보조말뚝은 직경 $72'' (= 1828\text{mm})$ 에 두께가 38mm, 44mm인 2개의 변(變)단면으로 구성되어 있다.

3.2 동해-1 가스 생산시설

동해-1 가스 생산시설 자켓구조물은 대구경 강관말뚝에 의해 지지되는 말뚝기초 형식으로 설계되었다. 말뚝은 8개의 말뚝($\phi 84''$)으로 구성되어 있으며, 그 특성치는 표 2와 같다. 주말뚝은 직경 $84'' (= 2134 \text{ mm})$ 에 두께가 57mm, 60mm, 57mm, 51mm, 44mm, 38mm, 51mm인 7개의 변단면으로 구성되어 있다.

3.3 인도 가스전 생산 시설 (MSP Platform)

MSP 가스 생산시설 자켓구조물은 대구경 강관말뚝에 의해 지지되는 말뚝기초 형식으로 설계되었다. 말뚝은 8개의 말뚝($\phi 84''$)으로 구성되어 있으며 표 2와 같다. Jacket 말뚝은 직경 $84'' (= 2134 \text{ mm})$ 에 두께가 50mm, 57mm, 44mm, 32mm, 38mm, 44mm인 6개의 변단면으로 구성되어 있으며, Flare pile pile은 직경이 1219mm에 두께가 38mm, 32mm, 25mm, 32mm, 38mm인 5개의 변단면으로 구성되어 있다. Jacket Pile의 전장은 198.7m에 자중이 541ton/본, Flare Tripod Pile의 전장은 184.955m에 자중이 278ton/본이다. 본 지역의 해저면 가스관의 배관 상태는 매우 복잡하여, 작업선의 엔커 작업등에 아주 세심한 고려를 하여야 하였다.

표 2. 강관말뚝의 특성치

자켓 구분 말뚝의 특성	이어도 종합해양과학기지		동해-1 가스 생산시설	인도 가스전 MSP-Platform
말뚝의 종류	main pile : $\Phi 60''$ (1524mm)	skirt pile : $\Phi 72''$ (1828mm)	skirt pile : $\Phi 84''$ (2134mm)	main pile : $\Phi 84''$ (2134mm)
두께(in) /말뚝머리의	1.26"(38mm) 1.50"(32mm) 1.73"(44mm)	1.50"(38mm) 1.73"(44mm) 2.00"(50mm)	2.24"(57mm) 2.36"(60mm) 2.01"(51mm) 1.73"(44mm) 1.50"(38mm)	1.50"(38mm) 1.26"(32mm) 2.24"(57mm)
말뚝의 단위중량(lbs/ft ³)			490.0	
말뚝의 수중단위중량 (lbs/ft ³)			426.0	
말뚝의 탄성계수(ksi)			29000	



그림 3. MSP 현장조건

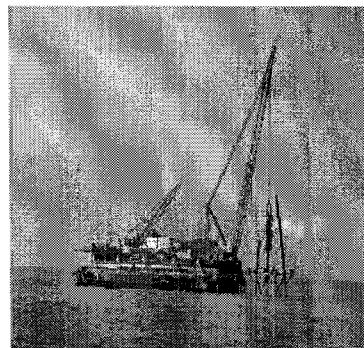


그림 4. 이어도 강관말뚝 항타전경

Pile : A1 - P3 LE = 115.2 M TL = 122.5 M
 $\phi 1524$ mm

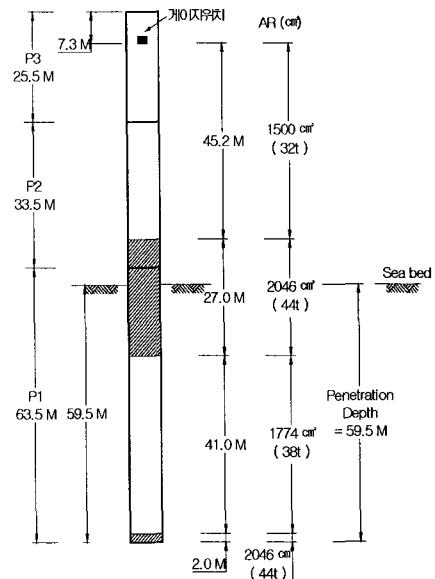


그림 5. 이어도 시험말뚝의 부등단면 제원

4. 설치 공정 비교

4.1 작업선

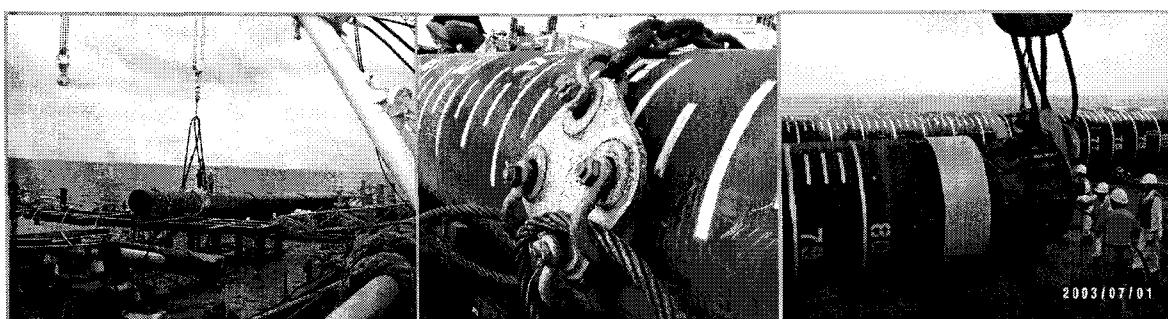
이어도 종합해양기지의 작업선은 HD-423호(그림 4 참조)였으며, 자켓은 HD-1007호, 말뚝은 동방 11호, 보조 크레인선은 태홍호(1000ton)가 사용되었다. 동해-1 가스 생산시설의 경우 LanJiang호(중국, 메인 크레인 3800ton)가 주작업 바지선으로 사용되었다. 인도 가스전(MSP Platform)의 경우 DB-30호가 사용되었으며, 자켓 및 파일 운반은 HD-1006호가 사용되었다. 특히 울산에서 제조된 생산 설비의 대부분이 8회차로 나누어 운송되었으며, 동기간 중에 지진해일이 발생되었다. 다행히 인도대륙 서쪽에 위치하여 파고 3~3.5m 정도로 3일간 도달되었다.

4.2 주요 설치 공정

이어도 종합해양과학기지는 수심 50m 지점에서 자켓을 해상크레인과 병렬 인양하여 진수한 후, Up-Ending Lifting하고 수심 40m 지점으로 앵커를 이용 이동하여 자켓을 안착하였다. 말뚝인양시 Pile Sleeve나 Clover leaf를 이용한 3점 인양 방식이 적용되었다. 스텁헤머를 사용하여 자주 큐선재의 교체하였으며 유압 해머는 유압 작동유의 온도 상승에 의한 작동유 냉각 대기등의 시간이 소요되었다.

표 3. 주요 공정 비교

자켓 구분 주요공정	이어도 종합해양과학기지	동해-1 가스 생산시설	인도 가스전 MSP-Platform
Jacket Launching	바지선 크레인 및 해양 크레인의 동시 인양	자켓운반선 기울이기 및 스라이딩	자켓운반선 기울이기 및 슬라이딩
Up Ending Lifting	인양	자켓 내 용수 공급	자켓 내 용수 공급
Positioning & Leveling		GPS, Gyro compass, Level	
Pile Lifting	Sleeve & Clover leaf	Pile handler	Pile Handler
Pile Driving	Steam Hammer VUL-360, VUL-560, MRBS-4600	Hydraulic Hammer MHU-800S Steam Hammer	Hydraulic Hammer MHU-600B Steam Hammer VUL-5100, MRBS-8000
Pile Monitoring condition	Over Water	Under Water	Over Water
Under Water Check	Diver	ROV	ROV

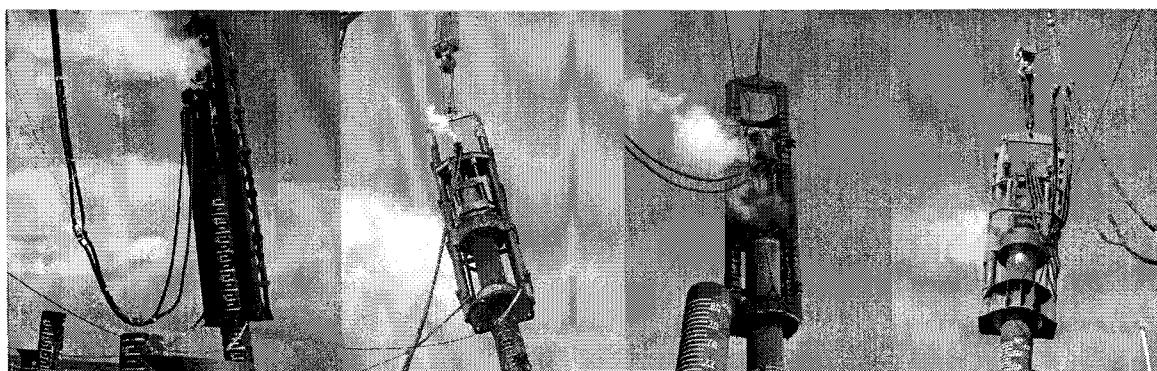


(a) Pile Sleeve 적용

(b) Clover Leaf 적용

(c) Pile Handler 적용

그림 6. 말뚝 인양 방법



(a) VUL-560

(b) MRBS-4600

(c) VUL-5100

(d) MRBS-8000

그림 7. Steam Hammer

4.3 적용 헤머

이어도 종합해양과학기지의 경우 항타헤머는 대구경 강관말뚝의 해상시공에 사용되는 VULCAN & MRBS 시리즈 Steam Hammer를 사용하였으며 헤머 종류별 특성은 표 4와 같다. 표에 제시한 특성치 중 쿠션재료 및 헤머의 효율은 시공여건에 따라 변화될 수 있으나 제작사에서 제시한 사양을 나타냈으며, VUL-560 헤머(그림 7(a))는 말뚝의 초기항타시(P1 및 P2 말뚝)에 사용하였으며, MRBS-4600 헤머(그림 7(b))는 최종항타(P3 말뚝)에 사용하였다. 유압 헤머의 경우 최대 효율이 80% 전후 스템 헤머 MRBS 계열은 48~58%, VULCAN 계열은 약 71%를 나타내었다. 큐션 재의 사용 전 후 상태는 그림 9와 같다. 수중항타 관리 및 수중 장애물 제거 관측을 위한 무인잠수정(ROV)의 사용이 필수적이었으며, 진수 및 조정화면은 그림 10과 같다.

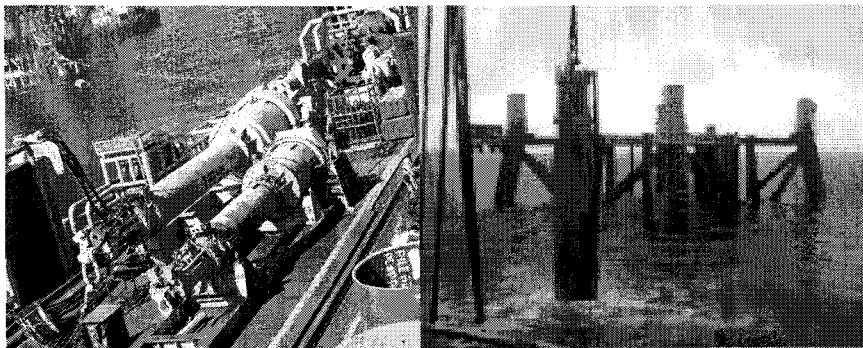


그림 8. 유압헤머 MHU-600B, MHU-300(좌) MHU-800S(우)

표 4. 헤머사양 및 효율

헤머의 종류	단위	VUL-560	MRBS-4600	MHU-800S	MHU-600B	VUL-5100	MRBS-8000
적용 현장	kN-m	이어도 종합해양과학기지		동해-1 가스생산시설		인도 천연가스전(MSP-Platform)	
rated energy	kN-m	425.0	690.0	880(800~1000m)	620	679	1400
램(ram)의 무게	kN	278.0	451.0	441.4	293.5	445.0	784.8
말뚝 캡(cap) 무게	kN	192.0	265.22	294.0	142.3	311.4	415.46
헤머의 효율(이론/실측)	%	75 /50~58	75 /50~58	85 /62~81	85 /79~80	75 /71	75 /36~48
쿠션재료		Micarta & Aluminum	bongossi- wood	-	-	bongossi- wood	bongossi- wood
쿠션 스프링값	kN/mm	3032.0	15689.0	-	-	15689.0	15689.0
쿠션 반발계수		0.80	0.75	-	-	0.75	0.75
비 고		초기항타시 적용 1대	최종항타시 적용 2대	8분 모두 수중 항타	최종항타 적용	초기항타 적용	최종항타 적용

주1) MHU-800S의 말뚝 캡 무게는 Anvil+Pile Sleeve 무게임.

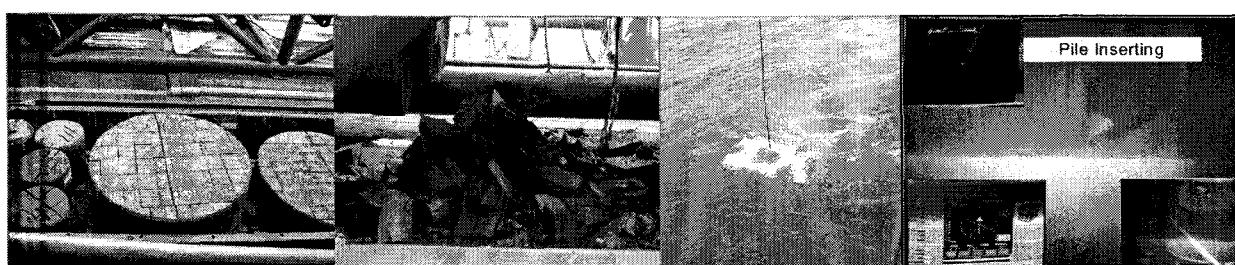


그림 9. Cushion 재(bongossiwood) : 미사용(좌), 사용후(우) 그림 10. ROV 진수(좌) 및 조종 화면(우)

5. 파일 모니터링 결과 비교

이어도 최종 관입심도 최종관입깊이는 59.5~62.5m를 관입하였고, 초기에 부분적으로 Run-Down이 발생하였다. 전체적으로 관입심도에 따라 지지력이 점차 증가하였고, 점성토 지반의 Set-up이 일부 확인되었다. 동해-1 가스 생산시설의 경우 매우 조밀한 모래층(G.L.-45m)에서 높은 지지력이 발생하였고, 주변마찰력은 심도 증가에 따라 증대되었다. 인도 천연가스전(MSP-Platform)은 초기에 Run-down이 발생하였으며, 근입 심도도 Platform의 경우 100m를 상회하였다.

표 5. 지지력 해석결과(CAPWAP)와 설계(GRLWEAP)와의 지지력 비교

구 분		CAPWAP Capacity (ton)			관입 깊이 (m)	비 고	
		주변마찰력	선단지지력	전체지지력			
이어도 종합해양 과학기지	A1-P3	EOID	1559.5	763.5	2323.0	59.5 극한하중 compression 태풍시(SF=1.5) 2,302ton	tension 1420ton
	A1-P3R	RSTR	1585.9	761.1	2347.0		
	A2-P3	EOID	1517.4	893.1	2410.5		
	B1-P3		1620.5	769.2	2389.8		
	B2-P3		1612.4	759.9	2372.3		
동해-1 가스 생산시설	P8	EOID	2697.3	2008.8	4706.0	41.5 극한하중 compression 4,487ton	tension 1356ton
	P8	EOID	2840.3	1383.7	4224.0	61.5	
	P8	EOID	2859.0	1545.3	4404.3	74.0	
	P8	RSTR	3520.2	1176.7	4796.9	75.0	
인도천연 가스전 (MSP-Platform)	A4-P5	main pile	2420.0	2800.0	5220.0	102.3 설계하중 compression M1 : 2986.2 M2 : 3001.7 F : 1377.5	tension 705.6 776.0 972.0
	B1-P5		2373.5	2991.8	5365.3	100.6	
	B2-P5	flare pile	2072.4	1679.0	3751.4	93.6	

주1) 이어도 종합해양과학기지의 EOID는 End of Initial Driving을 RSTR은 Restrike를 나타냄.

주2) 동해-1 가스 생산시설의 P8 pile은 심도별 지지력을 나타내며, 41.5m 지점의 very dense sand층에서 설계지력을 상회하는 지지력을 나타냄.

주3) 인도 천연가스전(MSP-Platform)은 M1은 Platform 바깥쪽 Pile A1, A4, B1, B4를, M2는 Platform 중심부 Pile A2, A3, B2를 나타내며, F는 flare pile을 나타냄.

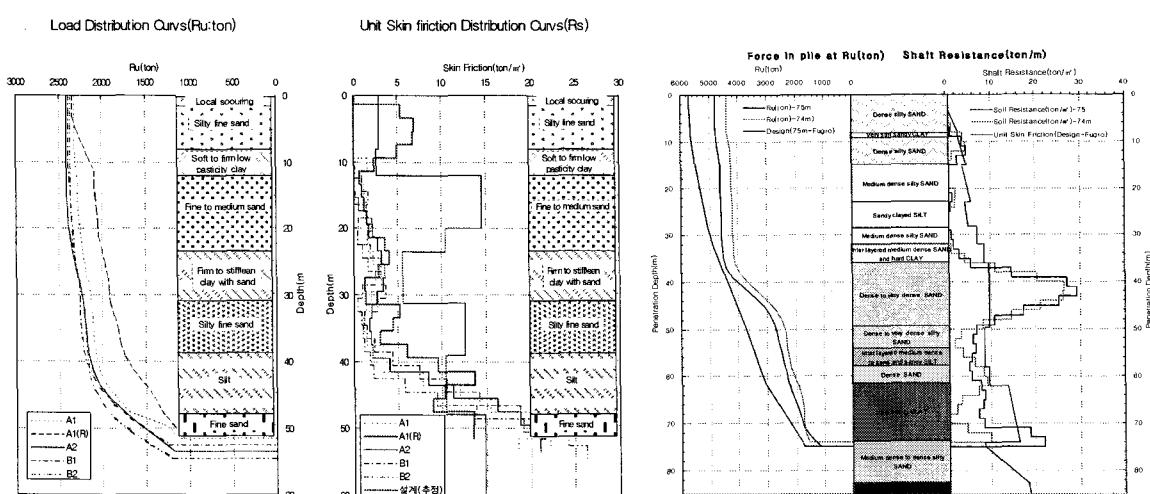


그림 11. 축하중 분포 및 단위 마찰력분포(이어도 종합해양과학기지(좌), 동해-1 생산시설(우))

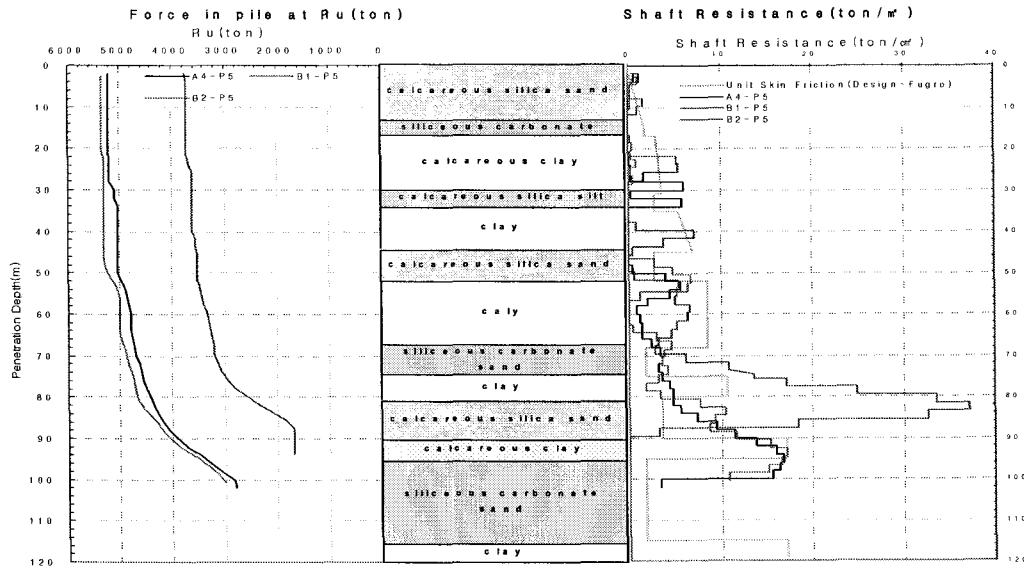


그림 12. 인도 MSP Platform 축하중분포 및 단위마찰력분포

참 고 문 헌

1. 김대학, 문상욱, 오경선, 박찬덕, 김학중(2005), “대구경 강관말뚝의 항타관입성 모니터링을 위한 PDA 적용 사례(3) – 인도 천연가스전” (사)한국지반공학회 기초기술위원회, 2005년 기초 기술 학술발표회 pp.151~167
2. 김대학, 박민철, 강형선, 이원제(2004), “수중 대구경 강관말뚝의 항타 관입성 모니터링을 위한 PDA 적용 사례”, (사)한국지반공학회 봄학술대회 발표 논문
3. 김대학, 이원제, 심재설, 윤길립(2003), “해상 대구경 강관말뚝의 항타관입성 모니터링을 위한 PDA 적용 사례”, (사)한국지반공학회 기초기술위원회, 2003년 기초 기술 학술발표회 pp.121~137
4. 해양수산부 (2002), 2001이어도 종합해양과학기지 구축사업보고서, pp.233~237
5. 현대중공업(2001), 동해-1 가스생산시설공사 해상토목분야 파일기초해석 계산서(O-CV-CA-002)
6. 현대중공업(2001), 동해-1 가스생산시설공사 해상토목분야 해상토목/건축 공사 시방서(O-CV-CS-0001)
7. 정대교, 심재설 (2001), “이어도(스코트라암초)의 생성과 진화”, 대한지질학회지 제37권 제4호, pp.537~548.
8. Unicorn Technical Institute(UTI)(2005), “Pile Monitoring Report, Mumbai High South Process (MSP) Platform Project, India”
9. Hyundai Heavy Industries Co., LTD.(HHI)(2004), “Installation Procedure for MSP Platform, Connection Bridge & New Flare System”, MSP Platform Project MSP-P-SC-5-980
10. UTI (2004), " Standard Work Procedure-The Method of Pile Monitoring." PM-001-3
11. Fugro Geonics Pvt. Ltd.(2004), “Report on Point Positioning & Elevation Survey for BHS-SA Platform in Mumbai High Field West Coast of India for Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.
12. Worley Pty Ltd. & ONGC(Oil and Natural Gas Corporation) (2002), "MSP Platform Project Offshore Platform Installation Specification" 032110-OS-GS-007
13. ASTM D 4945-00 Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
14. Samsung Engineering / Fugro (2000), Investigation & Basic Plan for Gorae V(Donghae-1) Gas Field Development Platform Area Geotechnical Investigation Report.