

해상 LNG 인수시설 대구경 강관말뚝 시공 사례 연구 A Case Study of large diameter steel pipe pile Foundation for Offshore LNG Facility

류대영¹⁾, Dae-Young You, 김형욱²⁾, Hyung-Wook Kim, 장우영³⁾, Woo-Young Jang,
최기병⁴⁾, Ki-Byung Choi, 조성한⁵⁾, Sung-Han Cho

^{1),2),3)} GS건설 지반팀 과장, manager, Geotechnical Engineering Team, GS E&C

⁴⁾ GS건설 지반팀 차장, Senior Manager, Geotechnical Engineering Team, GS E&C

⁵⁾ GS건설 지반팀 팀장, Senior Manager, Geotechnical Engineering Team, GS E&C

SYNOPSIS : In this paper, a case study of drivability and bearing capacity of large diameter steel pipe piles at PTT LNG site in Thailand is introduced. The LNG facilities were designed to be founded on steel pipe pile foundations driven into the weathered rock formation overlaid by sand layers. The drivability analyses of open ended pipe piles were carried out using GRL WEAP program and the bearing capacities of the piles were estimated. Dynamic load tests were performed to evaluate end bearing resistance, and it is shown that the measured end bearing resistance is smaller than the calculated end bearing because the plugging does not develop sufficiently in case of large diameter pipe piles.

Keywords : large diameter steel pipe pile, pile driving analysis, plugging effect, time effect

1. 서론

최근들어, 국내 건설사들의 해외 건설 프로젝트 수주 증가와 함께 대형 구조물 설계시 경제성 확보가 중요한 요소로 대두되고 있다. 지반공학적 관점에서는 기초성능의 최적화를 위해 말뚝직경의 대형화 및 시공방법의 단순화가 필수적인 요소가 되고 있다. 이에 따라 잔교, 접안시설 등 대형 해상구조물 기초시공 시에는 직접항타에 의한 대구경 강관말뚝의 시공이 매우 유용한 기초형식이며, 그 적용이 증가하고 있다.

강관말뚝은 관입성 및 항타장비 운용 등의 시공성이 확보될 경우 설계시 요구되는 기초의 성능을 매우 효율적으로 만족시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나, 대구경 강관말뚝은 선단폐색여부의 불확실성으로 인해 지지력의 예측이 어려울 뿐만 아니라 항타장비의 선정 또한 쉽지 않은 실정이다. 또한, 지반특성에 따른 시간경과효과(time effect)로 인해 주변마찰력 크기의 변화가 있을 경우에는 말뚝길이의 변화가 불가피 하므로 이에 대한 검토가 선행되어야 한다. 그리고 항타관입성 분석 시에는 선단폐색효과 예측의 오류로 인해 과도한 용량의 장비를 선정하는 경우가 있으므로 이에 대한 주의도 필요하다.

본 논문에서는 태국의 LNG 접안시설 공사현장의 해상 대구경 강관말뚝의 설계 및 시공사례를 소개하고자 한다. 현재 Project가 진행 중인 태국 Maptaphut LNG 접안시설 공사현장의 해상 구간에 시공되는 부두 및 접안 시설의 기초 형식은 구조물별 하중 조건을 고려하여 총 3가지 직경($\phi 762\text{mm}$, 914mm , 1067mm)의 강관말뚝공이 계획되었다. 말뚝 시공 전 GRL WEAP 프로그램을 이용하여 항타 공법으로 계획된 강관말뚝의 관입성분석을 수행하였으며, 소요 장비(Hammer) 제원 및 말뚝 항타 시 부재의 안정성 확보여부 등에 대한 검토를 하였다. 또한 항타 말뚝의 지지력 확인 및 시공 관리기준 선정을 위하여 위치별로 동재하시험을 각각 수행하였다.

2. 현장 개요 및 기초설계 현황

2.1 공사 개요

태국 Maptaphut에서 시공 중인 본 프로젝트는 LNG 인수 기지로 주요 시설로는 LNG 저장 탱크, Process & Utility 및 해상 구조물로 구성되어 있다. LNG 저장 탱크는 용량 16만 kℓ로 총 2기이며, Process & Utility는 기화송출설비 및 운전, 관리동 등 건물 36개 동으로 구성되어 있다. 해상 구조물은 총 2개소의 접안 및 하역 시설(Berth #1, Berth #3)과 자재/인원수송 및 Pipe Line 설치를 위한 Trestle 로 구성되어 있다.

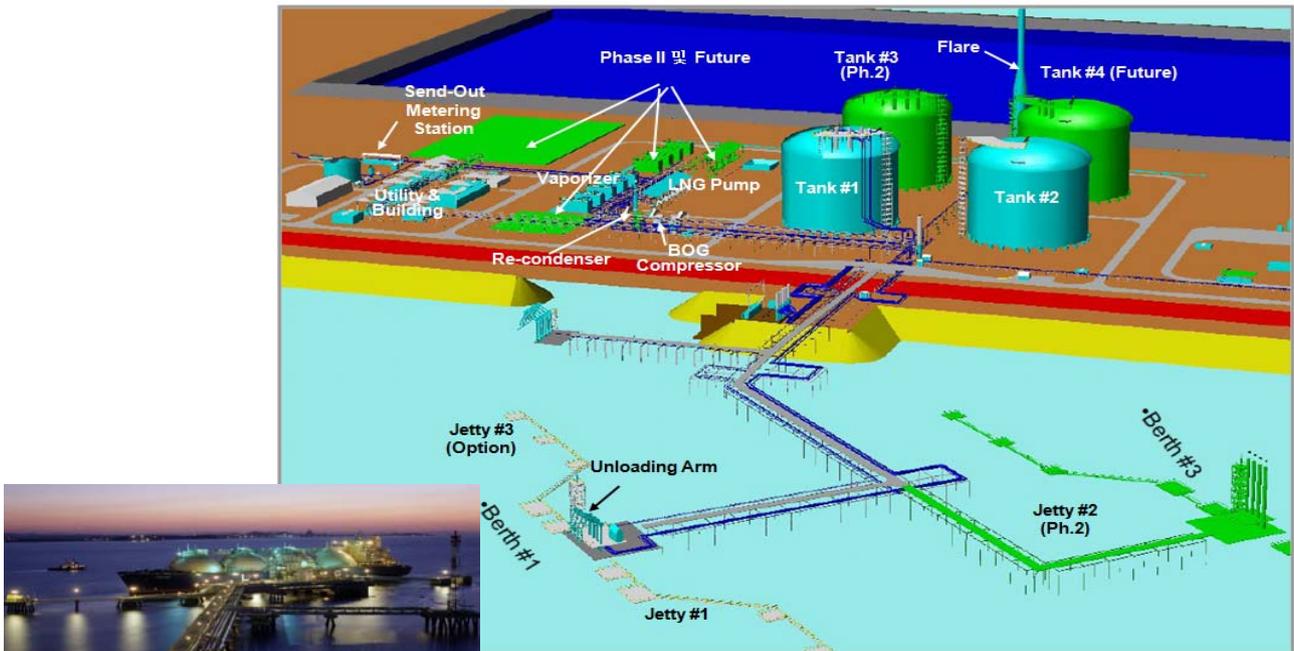


그림 1. 현장 현황도

본 논문에서는 주요 시설 중에서 접안시설 2개소(Berth #1, Berth #3)의 시공사례를 기술하였다. 그림 1은 현장 현황도를 나타낸 것이다. 그림에서 Berth#1은 자재 하역 시설인 Load Platform 1개소, 선박 접안 시설인 Breasting Dolphin 4개소, 선박의 안전한 계류를 위하여 계류삭을 걸어두는 시설인 Mooring Dolphin 6개소로 구성되어 있다. Berth#3은 Load Platform 1개소, Breasting Dolphin 3개소 그리고 Mooring Dolphin 2개소로 구성되어 있다. 구조물 기초 형식으로는 기존에 시공된 인접 구조물의 기초형식, 현장 여건, 경제성, 시공성 등을 고려하여 3가지 직경(φ762mm, 914mm, 1016mm)의 대구경 강관말뚝을 적용하였다. 본 공사 내용을 표 1에 요약하였다.

표 1. 공사 내용 요약

구분	주요 내용	기초 형식	비고
LNG Tank	160,000 kℓ 2기	현장타설말뚝	육상 시공분
Process & Utility	기화 송출 설비(기화용량 500만ton/년) 운전, 관리동 건물 36개동	PC 말뚝	
해상 구조물	Berth #1 : LP 1EA, BD 4EA, MD 6EA Berth #3 : LP 1EA, BD 3EA, MD 2EA Trestle : #1 No.1~39, #2 No.40~48	강관 말뚝	LP:Load Platform BD:Breasting Dolphin MD:Mooring Dolpin

2.2 지반 조건

본 공사가 진행 중인 부지는 반폐쇄성 해역인 태국만과 인접하여 위치하고 있다. 육상 구간은 실트질 모래 등으로 매립하여 조성된 부지로, 조사결과 해상 및 매립부지 하부 지층은 유사한 것으로 나타났다. 지반조사결과 매립층 하부 및 해상 구간은 기반암까지 총 6개의 층으로 구분되는 것으로 나타났으며, 지층 구성은 상부로부터 느슨한 실트섞인 모래층, 점토섞인 모래층, 모래섞인 점토층, 점토섞인 모래층, 실트 또는 점토섞인 모래층, 기반암 순으로 나타나는 것으로 조사되었다. 기반암 상부 지층은 대부분 모래층이 주를 이루고 있으며 구간별로 점토 및 실트가 섞여 있다. 그리고 일부 구간에서는 점토층이 나타나는 것으로 조사되었다. 기반암은 화강암으로 해저면에서 약 20m 하부에서 나타나는 것으로 조사되었다. 기반암 상부에 분포하는 실트 또는 점토섞인 모래층의 경우, SPT N값이 50/10~50/1 내외로 풍화암정도의 강도를 보이고 있으며, 해상 구조물 대구경 강관말뚝의 선단 지지층으로 선정하였다. 지층의 상세 현황은 표 2에 나타내었다.

표 2. 지층 현황

구분	지층 특성	층 후(m)	N-value	비고
Layer 1	실트질 모래, 모래	3.0~5.0	-	-
Layer 2	점토섞인 모래	1.0~6.0	7~34	-
Layer 3	모래섞인 점토	1.0~4.0	14~50	일부구간 분포
Layer 4	점토섞인 모래	2.0~8.0	32~50	-
Layer 5	실트섞인 모래, 점토섞인 모래	2.0~10.0	50/10~50/1	말뚝 선단
Layer 6	화강암	-	-	

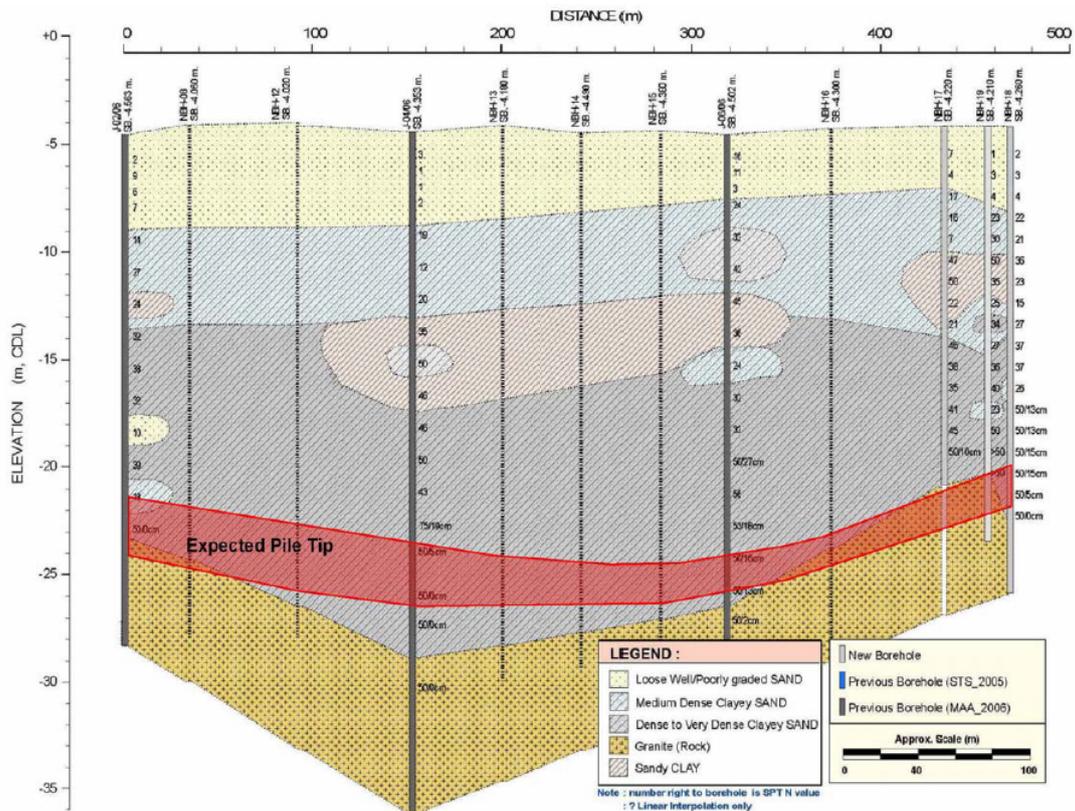


그림 1. 지층 단면도(Trestle)

2.3 기초 형식 선정 및 말뚝 설계개요

해상 구간에 시공되는 부두 및 접안 시설의 기초 형식은 구조물별 하중 조건을 고려하여 총 3가지 직경(Φ762mm, 914mm, 1067mm)의 대구경 강관말뚝을 항타 시공하는 것으로 계획하였다.

접안 선박의 용량이 큰 Berth #1의 경우 구조물별로 직경 Φ914mm 및 Φ1,067mm 강관말뚝을 말뚝 기초 형식으로 선정하였으며, 접안 선박의 용량이 상대적으로 적은 Berth #3의 경우 모든 기초를 Φ762mm 강관말뚝으로 적용하였다. 또한 자재 및 인원 수송로인 Trestle의 경우 Φ762mm 강관말뚝을 기초로 적용하였다. 또한 모든 기초에 수평하중을 고려하여 1:3~1:4 내외의 경사 말뚝을 적용하였다. 표 3은 구조물별 말뚝본수를 요약하여 나타내었다.

표 3. 구조물별 말뚝 수량

구분	Φ762×14t			φ914×17t			Φ1067×17t			비고	
	Vertical	Batter	Sum	Vertical	Batter	Sum	Vertical	Batter	Sum		
Berth #1	LP	-	-	10	30	40	-	-	-	1:4	
	BD	-	-	-	52	52	-	12	12	1:3	
	MD	-	-	-	-	-	-	64	64	1:3	
Berth #3	LP	6	12	18	-	-	-	-	-	1:4	
	BD	-	24	24	-	-	-	-	-	1:3	
	MD	-	8	8	-	-	-	-	-	1:3	
Trestle#1	1~39	67	147	214	-	-	-	-	-	1:4	
Trestle#3	40~48	11	24	35	-	-	-	-	-	1:4	
Sum		84	215	299	10	82	92	-	76	76	467

표 4. 기준 안전율

구분	Normal State	Abnormal State
선단지지력	2.0	1.5
주면마찰력 (압축)	2.5	1.9
주면마찰력 (인발)	3.0	2.3

대구경 강관말뚝 기초의 지지력은 지반조사 시 측정된 SPT-N값을 이용하는 Meyerhof's empirical formula(1976년)를 적용하여 산정하였으며, 말뚝 선단은 SPT-N값 50/5내외의 견고한 실트질 또는 점토질 모래층에 관입시키는 것으로 계획하였다. 각 조건별, 지지력별 기준 안전율은 표 4와 같으며, 인발지지력은 압축 시 주면마찰력값에 안전율을 증가시켜 산정하였다.

해상구간말뚝은 말뚝의 압축 지지력뿐만 아니라 파압, 지진하중 및 기타 하중 조합에 의한 인발하중이 조건별로 크게 발생하였으며, 말뚝의 필요관입깊이가 인발 하중에 의하여 결정되는 것으로 나타났다. 따라서, 당 현장의 경우 인발저항을 위한 말뚝 최소 관입깊이 확보가 말뚝의 안정성 측면에서 매우 중요한 요소로 대두되었다. 표 5는 Berth#1의 말뚝기초 지지력 산정결과중 일부를 요약하여 나타내었다.

표 5. 지지력 산정 결과(Berth#1)

구조물	말뚝직경 (m)	관입깊이 (m)	극한지지력		허용지지력		
			주면마찰력 (kN)	선단지지력 (kN)	압축지지력 (kN)	인발지지력 (kN)	
Berth #1	MD-6	1.067	10.0	4,157	8,942	6,133	1,386
	MD-5	1.067	10.0	2,497	8,942	5,470	832
	BD-3	0.914	8.0	1,841	6,042	3,757	614
	BD-2	0.914	8.0	1,900	6,567	4,043	633
	TP-1	0.762	16.5	1,835	4,560	3,014	612
	TP-25	0.762	19.0	2,737	4,560	3,375	912

3. 항타관입성 분석 및 시험 시공 결과

3.1 항타관입성 분석

GRL WEAP 프로그램을 이용하여 강관말뚝의 관입성 분석을 수행하였으며, 소요 장비(Hammer) 제원 및 말뚝 항타 시 부재의 안정성 확보여부 등에 대한 검토를 하였다. 관입성 검토조건은 표 6에 나타내었다. 말뚝 관입성 검토는 말뚝 직경별로 관입성이 가장 불량할 것으로 예상되는 지반조건을 대표 단면으로 선정하여 각 단면별로 수행하였으며, 사용 Hammer는 기존 강관말뚝 항타 시공 사례 등을 분석하여 표 7의 2가지 Type의 Hammer를 선정하였다. 또한 말뚝 관입성 분석 시 적용한 지반의 저항치는 말뚝설계 시 산정된 극한 저항력(주면마찰력, 선단지지력)을 적용하였으며, 말뚝 선단부는 말뚝의 관입심도, 장비 성능, 현장 여건 및 기타 시공시 불확실성 등을 고려하여 말뚝 선단부에서 폐색이 발생하는 것으로 가정하였다.

표 6. 관입성 검토조건

말뚝직경	허용항타응력	개 소	비 고
φ762×14t	$f_y=345\text{MPa}$	4	선단부 폐색 조건
φ914×16t	$F_{\text{allowable}}=0.9 \times f_y$ $=311\text{MPa}$	4	
φ1,067×17t		6	

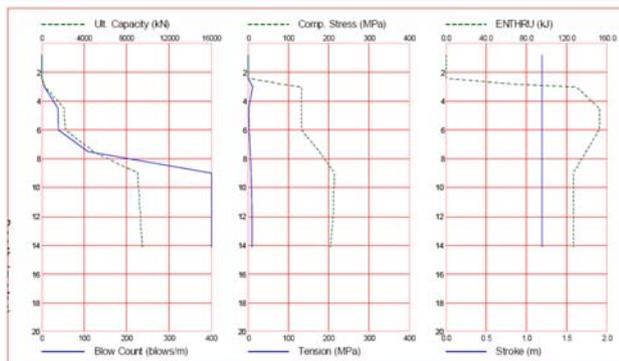
표 7. 관입성 검토용 Hammer 제원

구 분	Type-A	Type-B
최대 에너지(kN.m)	178	228
램중량(kN)	150.0	200.0
Max.stroke(m)	1.25	1.20
효율(%)	95	95
비고	Hydraulic Hammer	

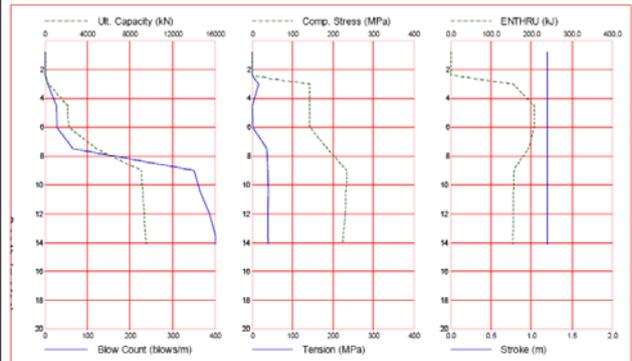
표8 은 관입성 검토 결과를 나타낸 것이다. 최대 178kJ의 에너지가 가능한 Hammer를 이용할 경우, 말뚝이 지지층까지 관입되기 위해서는 강관말뚝 1m 관입시 1,000타 이상의 항타가 필요한 것으로 검토되었다. 이러한 수치는 본 설계 관리 기준인 500blow/1m 를 초과하는 수치로 말뚝 항타 시 말뚝의 손상 및 시공성의 저하가 예상되는 결과이다. 그러나 최대 228kJ의 항타 에너지 확보가 가능한 Hammer의 경우 모든 조건에서 말뚝 항타 관리치를 만족하였으며, 또한 항타로 인한 발생응력도 말뚝의 허용응력내에 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 228kN.m 이상의 항타 에너지 확보가 가능한 Hammer를 사용하는 것으로 설계시 제안하였다.

표 8. 관입성 검토결과

위치	말뚝직경 (mm)	Hammer Type-A				Hammer Type-B			
		BPM	압축응력 (MPa)	인장응력 (MPa)	비고	BPM	압축응력 (MPa)	인장응력 (MPa)	비고
Trestle-13	φ762×14t	1508	273.3	37.8	N.G	296	304.0	49.0	O.K
Berth#1 BD-3	φ914×16t	340	235.3	21.4	O.K	160	248.3	39.3	O.K
Berth#1 MD-6	φ1,067×17t	1475	214.9	11.7	N.G	425	233.9	39.6	O.K



관입성 분석결과 (φ1,067, Hammer Type-A)



관입성 분석결과 (φ1,067, Hammer Type-B)

3.2 시공 장비 및 동재하시험 위치 선정

해상 구간 말뚝 시공은 태국 현지에서 수급가능한 항타장비를 이용하여, 2009년 1월 시항타를 시작으로 공사가 진행되는 것으로 계획하였다. 따라서 말뚝 항타 장비선정을 위하여 항타관입성 분석으로부터 제시된 조건을 만족하는 Hammer를 조사한 결과, 표 9의 2가지 Type의 Hammer가 현지에서 수급 가능한 것으로 나타났다.

표 9. 시항타용 Hammer 제원

구 분	D-80	D-100
최대 에너지(kN.m)	225	280
램중량(kN)	80	100
Max.stroke(m)	3.5	3.5
효율(%)	80	80
비고	Diesel Hammer	

두 가지 Hammer 모두 장비제원상 제시된 최대 에너지는 기존 설계에서 제안된 228kN.m를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 상기 Hammer의 경우 모두 Diesel Hammer로서 기존 시공 사례 등을 살펴볼 때 실제 항타에너지 효율이 50% 내외이며, 일정한 Stroke 관리가 불가능하여 말뚝 항타시 여러 문제점이 예상되었다.

그러나 공기 등 현장 여건을 감안할 때 별도의 대안을 수립하기가 어려워 상기 장비를 이용하여 각 Hammer 별로 시항타 및 동재하시험을 수행한 후, 최종적으로 항타 Hammer의 적정성 여부를 검토하기로 하였다.

상기 Hammer를 이용한 항타 시공성 및 지지력 확보 여부를 확인하기 위하여 말뚝 직경별 시항타 및 동재하 계획을 수립하였다. $\phi 762\text{mm}$, 914mm 강관말뚝은 D-80, $\phi 1067\text{mm}$ 말뚝의 경우 D-100을 사용하여 시항타 하는 것으로 계획하였으며, 시항타 위치는 지반조사결과 각 말뚝 직경별로 지반이 조밀하여 말뚝의 항타 시공이 가장 어려울 것으로 판단되는 위치를 선정하였다. 또한 항타 말뚝의 지지력 확인 및 시공 관리기준 선정을 위하여 위치별로 동재하시험을 각각 수행하였다. 동재하시험 위치의 말뚝설계 현황은 표 10과 같다.

표 10. 동재하시험 위치 말뚝 설계요약

위치	말뚝 종류	설계 극한 지지력(kN)			관입길이 (m)	선단 조건
		선단 지지력	주면 마찰력	합계		
Berth#3 BD2	$\Phi 762 \times 14\text{t}$	4,560	2,447	7,007	13.7	N=50/13~50/8, 4m 근입
Berth#1 LP	$\Phi 914 \times 16\text{t}$	6,567	1,505	8,072	9.0	풍화암 4m 근입
Berth#1 MD#3	$\Phi 1,067 \times 17\text{t}$	8,584	2,427	11,011	11.0	N=50/1~5

Berth #3 Breasting Dolphin No.2 시공 부지의 지반 조건은 상부로부터 약 2m 구간은 SPT-N값 10미만의 느슨한 점토질 모래층으로 구성되어 있으며, 그 하부로 단단한 모래질 점토층이 약 3m, 그 하부로 조밀한 점토질 모래층이 분포하는 것으로 나타났다. Berth #1 Load Platform 구간의 경우 상부로부터 약 5m 구간은 SPT-N값 30~40내외의 매우 조밀한 점토질 모래층으로 구성되어 있으며, 그 하부로 풍화된 화강암(N=50/1~5)이 분포하는 것으로 조사되었다. Berth #1 Mooring Dolphin #3 시공 부지는 상부로부터 약 1.0m 구간은 느슨한 모래층, 그 하부로 SPT N값 20/30~50/30 내외의 점토질 모래층이 약 4.0m, SPT N값 50/30 내외의 점토층이 약 2.0m로 분포하며, 그 하부로 말뚝의 선단 지지층인 SPT N값 50/1~50/10내외의 점토질 모래층이 분포하는 것으로 조사되었다.

3.3 동재하 시험결과

말뚝 시험결과, 최종적으로 말뚝은 설계 관입심도 이상 지중에 관입되었으며, 1m 관입시 최대 타격 횟수는 약 170~480회 정도로 기준치인 500Blow/m를 만족하였다. 시험타시 수행한 동재하시험결과, 설계지지력을 만족하는 것으로 나타났다. Φ914mm 말뚝의 경우 Initial Test에서는 설계값에 미치지 못하였으나, Restrike Test를 통해 설계지지력을 만족하는 것을 확인하였다. 그러나 선단지지력의 경우 동재하시험 결과가 설계값과 비교하여 다소 작은 값을 나타내었는데, 이는 설계시 가정한 바와 달리 실제 시공시 말뚝선단에 완전한 폐색이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 주변마찰력의 경우 설계값과 비교하여 약 60%이상 큰 값이 동재하시험 결과 나타났는데, 이는 모래층에 포함된 실트 및 점토 등의 영향으로(설계시 모래층 가정) 주변마찰력이 크게 나타난 것으로 판단된다.

표 11. 시험타 및 동재하시험 결과

구 분		관입심도(m)		m당 타격횟수(회)	CAPWAP 결과(kN)			항타에너지(kN.m)	Hammer
		설계	실시공		선단지지력	주변마찰력	합계		
Φ762×14t	Initial	13.7	13.7	최대 480	4,160	3,860	8,020	104	D-80
Φ914×16t	Initial	9.0	10.5	최대 170	5,230	1,180	6,410	108	D-80
	Restrike				5,765	2,815	8,580	89	
Φ1,067×17t	Initial	11.0	17.5	최대 280	5,075	6,095	11,170	102	D-100

동재하시험 결과로부터 D-80, D-100 Hammer를 이용한 대구경 강관말뚝의 시공성은 양호한 것으로 확인하였으며, 말뚝 시공관리는 시험타시 이용한 관리 기준(2mm/Blow)을 적용하는 것으로 계획하였다. 직경효과로 인한 선단 폐색효과의 발현정도에 따라 선단지지력이 설계값보다 작게 나타나고 있으나, 말뚝의 주변마찰력이 설계값과 비교하여 상당히 큰 값을 보이므로 전체지지력은 충분히 설계값을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 설계시 예측한 필요 항타에너지와 비교하여 약 50% 이하의 항타에너지로도 말뚝의 시공성은 확보되는 것으로 나타났다. 이는 관입성 분석시 적용한 말뚝의 선단 관입저항값을 완전폐색조건으로 가정하여 과다하게 산정함에 따른 것으로 판단된다.

3.4 시험 결과 분석

말뚝직경별로 수행한 시험타 및 동재하시험 결과 말뚝의 시공성은 확보되는 것으로 나타났다. 그러나, 시험타 및 재하시험 등을 분석한 결과 설계시 가정한 조건과 실제 시공 조건의 차이로 인하여 말뚝 지지력 및 관입성에 상당한 차이가 나타나는 것으로 조사되었다.

그 원인으로는 첫째, 말뚝의 선단부 폐색 조건의 차이로서, 설계시 대부분의 말뚝이 양호한 지층(SPT N=40/30~50/30이상)에 5D(D:말뚝직경)이상 근입되어 모두 폐색되는 조건으로 설계를 하였으나, 시공시 수행한 재하시험 결과에 의하면 Φ914mm이상의 강관말뚝에서는 폐색이 완벽하게 발생하지 않는 것으로 나타났다.

둘째, 말뚝 설계시 모든 지층을 모래층으로 간주하여 주변마찰력을 산정하였으나, 재하시험결과 설계시 산정한 주변마찰력이 상당히 보수적인 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 이는 태국 현지 지반의 특성상, 지반조사결과 모래층으로 분류된 지층에 포함된 실트 및 점토 성분이 시간경과에 따라 말뚝 주변마찰력의 증가를 유발하여 설계시 예상한 값보다 큰 주변마찰력을 나타낸 것으로 판단된다.

셋째, 설계시 수행된 말뚝 관입성 검토가 상당히 보수적인 결과를 가져옴에 따라 항타장비 선정시 과다한 용량의 장비를 선정하는 것으로 나타났다. 이는 설계시 고려한 말뚝 선단부 폐색 조건 등의 영향 및 기준에 인접한 현장에서 수행된 시공 결과 등을 반영치 못한 결과로 판단된다. 선단지지력 및 항타에너지의 측정값은 표 12에 요약하여 나타내었다.

표 12. 선단지지력 및 항타에너지 측정값 비교

구 분	선단지지력(kN)			항타 에너지(kN.m)			Hammer	비 고
	설계값	시험값	시험/설계 (%)	설계값	시험값	시험/설계 (%)		
Φ762	4,560	4,160	91	228	104	46	D-80	Initial
Φ914	6,567	5,230	79		108	47		Initial
	6,567	5,765	87		89	39		Restrike
Φ1,067	8,584	5,075	59		102	44	D-100	Initial

4. 결 언

본 논문에서는 태국 LNG접안시설 현장에서 실시된 해상 대구경 강관말뚝 항타 시공사례에 대해 소개 하였으며, 본 시공사례의 경험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 대구경 강관말뚝의 선단 지지력 산정시 말뚝 폐색조건에 따라 지지력 산정결과가 크게 달라지게 되므로 반드시 말뚝 직경에 따른 선단부 폐색 조건을 정확히 고려하여 말뚝 지지력을 산정해야 할 것으로 판단된다.
2. 인발하중이 말뚝길이를 결정하는 경우, 시간경과효과를 고려하여 말뚝 주변마찰력을 산정한다면 상당한 시공성 및 경제성 확보가 가능하므로, 사전에 현지 지반 특성을 충분히 파악하여 설계를 수행하여야 할 것으로 판단된다.
3. 말뚝 관입성 분석에 따른 항타장비 선정시, 말뚝 선단부 폐색 조건, 주변마찰력 등의 지반 조건, 현지 항타장비의 에너지 효율 등이 매우 중요한 요소로 작용하므로, 사전에 이에 대한 검토를 충분히 수행하여야 할 것이다.

참고문헌

1. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 4th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA, 2007. pp.10-121~10-122.
2. 조천환(1998), “타입말뚝의 Set-up효과의 예측”, 한국지반공학회 '98가을학술발표회
3. “구조물 기초 설계기준 해설”, (사)한국지반공학회, 2009, pp.322~325
4. 송명준(2009), “동재하시험을 이용한 항타관리 사례연구”, (사)한국지반공학회, 2009 기초기술위원회 Workshop-동재하시험의 현황과 숙제-
5. Mayerhof, 1976, "Bearing capacity and settlement of Pile Foundations.", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE Vol.102, No.GT3, pp. 196-228