

## 해안가 연약지반 설계지지력 확인을 위한 양방향재하시험 수행 사례

KICEEM



오규선 무영CM건축사사무소 부산 옹호만 현장 신규사원  
김현규 무영CM건축사사무소 부산 옹호만 현장 감리단장  
오정우 무영CM건축사사무소 기술지원 본부 건축차장  
장평지 무영CM건축사사무소 기술지원 본부 토목PM

### 1. 서론

부산 옹호만 복합시설 신축공사(The W)현장은 부산 남구 옹호동에 위치한 높이 246.8m(지하 6층, 지상 69층)의 초고층 건축물 공사현장이다. 건축면적 21,390.78㎡, 연면적 490,480.80㎡의 면적에 300개 이상의 상가와 대형평형 공동주택1,488세대가 들어설 예정이다. 이 지역은 과거 항만으로 사용되던 부지를 매립한 토지 위에 공사가 진행되었다. 이 때문에 G.L (Ground Level)에서 약 4.5m까지의 토지들이 매립토로 구성되어 있었고, 이에 따라 파일을 이용한 기초공법이 필수적이었다.



그림 1. 옹호만 복합시설 신축공사 현장 전경

당현장은 지하 6층, 지상 69층의 대형건축물 현장으로 지반에 하중을 전달 하는 기초도 대구경 현장 타설 말뚝으로 각 말뚝에 작용하는 하중이 매우 크게 작용하며 주변마찰력과 선단지지력의 특성과 거동파악이 설계의 중요한 요소가 되고 있다.

### 2. 양방향 재하시험의 특징 및 필요성

#### 가. 시험의 개요

일방향재하시험은 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력 시스템을 이용해야 하기 때문에 시험하중이 클 경우 재하용량의 한계와 현장의 적용이 불가능한 경우 시험을 할 수 없는 경우가 발생한다. 이에 대한 대책으로 양방향재하시험이 제안되었다. 양방향 재하시험은 시험말뚝의 선단에 유압잭을 장착하여 유압잭의 작용과 반작용의 원리에 따라 상향력과 하향력을 발생시켜 상하향변위를 측정하는 방식으로 시험하중이 클 경우에는 일방향재하시험보다 경제적이다.

양방향 재하시험은 미국 노스웨스턴 대학의 명예 교수인 Jory O. Osterberg 박사에 의해 처음 고안되었으며 최초 상업적 현장말뚝재하시험은 1989년에 이루어졌다. 미국, 캐나다, 일본등에 특히 출원되었고 10여개국에서 550여회 이상의 시험이 수행되어 왔다. 국내에서도 최근 연약지반 심도가 매우깊은 인천 및 부산지역의 현장타설말뚝 및 기성말뚝에 현장 시공 적정성 판단과 연구목적등으로 많이 사용되고 있다.

#### 나. 양방향재하시험의 특징

종래의 말뚝 정재하시험의 경우 시험하중만큼의 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력이 필요하고, 이런 반력하중을 사용할 수 없을 경우 말뚝정재하시험을 할 수 없다. 그러나 양방향 재하시험은 특수하게 제작된 고압의 유압식 잭(Jack)을 일반적으로 말뚝선단 가까이 설치하여 선단지지력과 주변마찰력에 의해 하중재하에 필요한 반력을 상호간에 마련해 주는 방법이므로 별도의 하중재하장치가 필요 없고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서 적용이 가능하다.

양방향재하시험은 시험하중이 매우 큰 대규모 현장타설 말뚝에서 경제적인 시험방법이다. 양방향재하시험은 기존의 가압 및 반력시스템을 이용하는 일방향재하시험과 비교하여 표1과 같은 장단점이 있다. 양방향재하시험시 특이사항은 선단지지력과 주변마찰력을 분리측정 가능하나 선단지지력과 주변마찰력중 어느 한쪽의 힘이 먼저 극한에 도달하면 시험이 종료된다.

#### 다. 양방향재하시험의 현장 적용성

말뚝에 작용하는 하중은 선단지지력과 주변마찰력에 의해 지 지되고, 이러한 말뚝기초의 지지력 및 침하량을 추정하기 위한 여러 가지 이론적·경험적 방법들이 제안되었으며, 이 방법들 중에서 말뚝정재하시험의 신뢰도가 가장 높다. 그러나 말뚝재하시험 방법은 특성상 재하 할 수 있는 하중의 크기에 한계가 있고 지지력확인만 가능하지만, 양방향 재하시험은 말뚝 단면 내에 재하 장치를 설치할 경우 재하 장치의 상·하방향으로 하중이 작용되어 말뚝 자체의 선단지지력과 주변 마찰력을 반력으로 이용하므로 재하용량의 두배까지 시험이 가능하여 기존의 정재하 시험으로 불가능하였던 매우 큰 하중까지 재하가 가능하며 선단지지력과 주변 마찰력을 직접 분리하여 측정함으로써 정확한 선단지지력의 측정이 가능하고 종전에는 1개소 시험에 약 1억원이라는 고가의 비용이 발생하여 현장에 적용하기에 무리가 있었으나 현재는 거의 반값 수준으로 시행할 수 있어 사용빈도가 늘어 나고 있다.

이에 시공사, 감리단 및 설계사는 상호 협의 및 시공 V.E.를 통해 최종적으로 R.C.D(Revers Circulation Dirll) Pile을 선정하여 본 공사에 착수하였다. 현재 R.C.D. Pile 공사는 완료하였으며, 지상층 골조공사가 진행 중에 있다.

표 1. 양방향재하시험의 장단점 분석

장점	경제성	별도의 지상반력장치가 필요없기 때문에 시험하중이 높을수록 경제적인
	시험용량	무한대
지지력 분리측정	선단지지력과 주변마찰력 분리측정 별도의 하중전이시험이 필요없음	
안정성	지상반력구조물이 없기 때문에 시험의 안정성이 높음 종래의 정재하시험으로 불가능한 해상 및 완만한 경사지 시험도 가능	
작업공간	3m 이내의 공간만 있어도 시험가능	
연속시험	말뚝의 Set up 혹은 에이징 효과 확인 가능	
단점	시험 전 설치	유압잭이 반드시 시공시에 설치되어야 함
	시험의 종료	선단지지력 또는 주변마찰력 중 한쪽이 극한에 도달하거나 셀의 재하용량 및 실린더길이가 한계에 도달하면 시험종료
	등가하중곡선	말뚝두부의 등가적정하중 침하곡선의 변곡점이 나타나지 않을 수도 있다
	경제성	100 ~ 200t 정도의 작은 시험하중에는 오히려 비경제적
	적용말뚝의 한계	H말뚝, 널말뚝, 나무말뚝에는 적용 불가
	셀의 소모성	한번설치된 셀은 소모품으로 재사용이 불가

### 3. 양방향 재하시험 적용

#### 가. 절차 및 방법

양방향 재하시험을 실시하기 위해 철근망 제작 시 철근면에 변위계를 부착하고 선단부위에는 유압실린더를 설치하였다. 유압실린더 상·하부에는 플레이트를 설치하여 유압이 가해질 때 플레이트의 거동을 측정함으로써 말뚝주변 저항력과 선단지지력을 동시에 시험하였다. 이를 통해서 말뚝의 전체 지지력을 파악할 수 있다. 양방향 재하시험은 4개동에 4개본 씩 총 16본을 수행하였으며, 설치된 실린더는 각 본당 6개(각 2,000ton)이며 상·하플레이트는 Ø1,950 X 150mm로 구성되었다. 지지력 측정을 위한 센서는 심도별 10개소에 설치하였고, 각 개소 당 2개의 센서를 2방향으로 설치하였다.

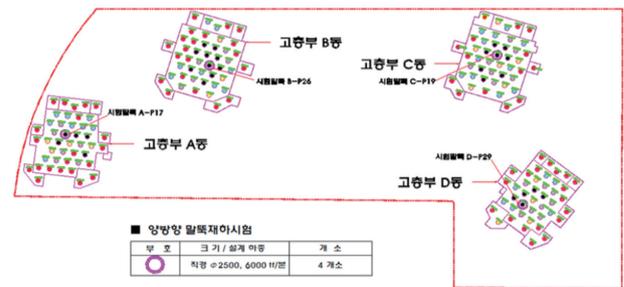


그림 2. 양방향재하시험 위치도

#### 나. 적용 시험기준

표 2. 적용시험기준

분석방법	기준명 또는 제안자	기준 침하량	안전율	적용 유무
전침하량	네덜란드, 오스트리아	25.4	2.0	●
	영국 BS 규정	말뚝직경의 10%	2.2~3.0	●
순침하량	미국 도로설계기준	6.3(설계하중)	2.0	●
	미국 Boston 설계기준	12.7	2.0	●
항복하중	구조물기초설계기준	P-S, logP-logS	2.0	●
	구조물기초설계기준	DAVISSON Method	2.0	●

### 다. 시험 Process

표 3. 시험 Process

No	Process	유의사항 및 고려사항	No	Process	유의사항 및 고려사항
1	 위치선정 및 굴착	• 위치측량 및 수직도(Koden) 관리	5	 Telltale 고정	• Telltale은 상판과 하판의 변위를 지상에 전달하는 장치로 시공 철저 관리
	2			 재하장치 반입	
3	 하중전이 센서설치	• 주철근 내부에 위치토록 설치 • 충분한 Spacer로 철근망 변위 없게 관리	7	 콘크리트 타설	• 선단부 확인후 Slime제거 (Surging 또는 Air Lifting) • 건전도 시험
	4			 재하장치에 철근망 조립	

### 라. 시험 결과 및 분석

시험결과 4개소 모두 설계하중 이상의 성능을 나타냈으며, 항복 시 변위 범위도 적정범위 이내로 나타났다. 더불어 각 Pile의 지지력은 선단지지력보다 면에 의한 마찰지지력이 더 높은 것이 특징적으로 나타났다.

마찰지지력이 더 높게 나타난 이유는 R.C.D. Pile이 형성된 주변지반이 풍화암, 연암 등의 단단한 지반으로 이루어져 있기 때문인 것으로 판단된다. 이를 통하여 R.C.D. Pile이 다른 Pile과 달리 선단지지력보다는 높은 마찰지지력으로 구조물의 하중을 지반에 전달하고 지진하중에도 견뎌낸다는 사실을 알 수 있었다.

표 4. 재하시험 결과

위치	직경 (mm)	말뚝길이 (m)	설계하중 (tonf)	시험하중 (tonf)	하중지지력 (tonf)		항복하중 (tonf)	최대지지력 (tonf)
					선단지지력	마찰지지력		
A동	2500	6.0	6,000	12,000	2,500.0	5,874.3	17,992.8	8,996.4
B동		17.2			5,625.0	5,889.5	16,855.1	8,427.5
C동		9.0			-	-	-	-
D동		5.0			3,275.0	4,402.2	12,306.7	6,153.4

### 4. 결론

구조물의 막대한 하중을 지지하기 위해서는 R.C.D. 시공시 근입깊이, 수직도, 철근조립상태 및 전단면과의 밀실정도를 철저히 관리하는 것이 핵심이다. 또한 이를 확인 하는 시험은 절대적으로 중요하지만 건전도 시험만으로는 설계지지력을 만족하는지 확인 할 수 없으므로 양방향재하시험을 통해 구조물의 하중을 지반에 안전하게 전달할 수 있는지를 확인 가능하였다.

양방향 재하시험은 미국 노스웨스턴대학의 명예교수인 Jory O. Osterberg 박사에 의해 처음 고안되었으며, 국내에는 최근들어 건축물들이 초고층화로 말뚝이 대구경화되어 적용이 많아지고는 있지만 가격이 고가라는 문제가 있었으나 최근에는 종전가격보다 많이 다운되어 적용이 더 증가할 것으로 기대한다.

본 현장에서는 감리단과 시공사의 유기적인 협력과 보다 체계적인 실질적인 품질관리가 수행되어 성공적인 R.C.D. 파일 공사가 수행될 수 있었다. 현재 본 현장은 지상 30층 이상까지의 골조공사가 이루어졌으며 건설한 R.C.D. 위에 구조물에 가해지는 풍하중 및 지진하중을 견뎌낼 수 있고 69층까지 안정적인 구조물이 완공되기를 기원하며 이 글을 마친다.