

# 말뚝재하시험의 종류와 최근 기술 동향

글 | 박흥기 | 기술개발부 과장 | 전화 : 02-3433-7736 E-mail : park7882@ssyenc.com

글 | 이근식 | 신화GTI 대표이사 | 전화 : 02-597-6742 E-mail : geopave@naver.com

## 1. 서론

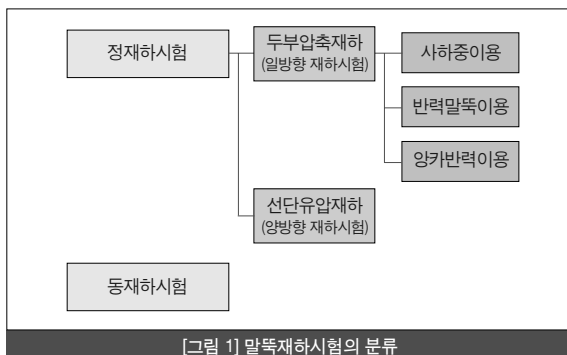
말뚝 정재하시험은 일종의 실물시험으로 말뚝에 실효중을 가하여 실제 상부구조물이 건설되었을 때를 재현하므로 말뚝 지지력 측정 시 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 그러나 하중재하를 위한 가압 및 반력시스템 등이 필요하므로 설계하중이 매우 클 경우 시험을 수행하는 것이 불가능하다.

최근 초고층 건축물이 계획됨에 따라 높은 하중을 안전하게 지지할 수 있는 대형기초(Mega Foundation)가 요구되고 있다. 대형기초는 기성말뚝의 적용이 어려워 대규모 현장타설말뚝기초가 시공되고 있으며, 대형기초에 대한 지지력 평가를 위해 기존의 가압 및 반력시스템을 적용하는 정재하시험보다는 선단유압재하시험(양방향재하시험)의 적용이 확대되고 있는 실정이다.

본고에서는 기존에 널리 사용되고 있는 재하시험과 최근 적용이 확대되고 있는 양방향재하시험을 소개함으로써 현장에 적합한 시험법을 결정하는데 도움이 되고자 한다.

## 2. 말뚝 재하시험의 분류

말뚝 재하시험은 [그림 1]과 같이 시험의 기본 개념에 따라 정재하



시험과 동재하시험으로 나눌 수 있으며, 정재하시험은 두부압축재하(일방향재하)시험과 선단유압재하(양방향재하)시험과 구분할 수 있다.

### 2-1. 두부압축재하(일방향재하)시험

두부압축재하시험(이하 일방향재하시험)은 말뚝두부에 일정한 시간동안 직접 시험하중을 재하하여 하중-침하량 관계의 Data를 구하고 이를 각 분석법에 따라 규명하여 말뚝의 지지력을 산정하는 시험이다. 말뚝두부에 직접 시험하중을 재하하는 방식으로 가압 및 반력시스템에 따라 사하중 이용방식, 반력말뚝 이용방식, 양가 반력 이용방식으로 분류할 수 있으며, 현재까지 가장 신뢰도가 높은 시험방법이나 비용과 시간이 많이 소요되며, 지지력의 세부구성(선단지지력과 주변마찰력) 지지력의 구분이 어렵다는 단점이 있다.

### 2-2. 선단유압재하(양방향재하)시험

일방향재하시험은 사하중이나 반력말뚝, 반력양가 등의 반력시스템을 이용해야 하기 때문에 시험하중이 클 경우 재하용량의 한계와 현장의 적용이 불가능한 경우 시험을 할 수 없는 경우가 발생한다. 이에 대한 대책으로 양방향재하시험이 제안되었다.

양방향재하시험은 시험말뚝의 선단에 유압잭을 장착하여 유압잭의 작용과 반작용의 원리에 따라 상향력과 하향력을 발생시켜 상하향변위를 측정하는 방식으로 시험하중이 클 경우에는 일방향재하시험보다 경제적이다.

양방향재하시험은 1987년경에 미국 노스웨스턴 대학의 명예 교수인 Jory O.Osterberg 박사에 의해 처음 고안되었으며 최초 상업적 현장말뚝재하시험은 1989년에 이루어졌다. 미국, 캐나다, 일본 등에 특히 출원되었고 10여 개국에서 550여 회 이상의 시험이 수행되어 왔다. 국내에서도 최근 연약지반 심도가 매우 깊은 인천 및 부

산지역의 현장타설말뚝 및 기성말뚝에 현장시공 적정성 판단과 연 구목적 등으로 많이 사용되고 있다.

### 2-3 동재하시험

동재하시험은 항타분석기(P.D.A; pile driving analyzer)를 이용하여 시험말뚝 주변에 가속도계(Accelerometer) 및 변형률계(Strain Transducer)를 설치하고 항타분석기(P.D.A)에 연결한 후 Hammer 로 시험말뚝을 항타하여 이때 발생하는 변형을 측정하는 시험이 다. 말뚝의 변위와 가속도를 측정하여 항타장비의 효율적인 작동 여부 및 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 예상지지력, 말뚝의 손 상정도 등의 결과를 산출함으로써 시험방법이 간단하고 시간 및 비용이 절감되나 시험하중이 증가할수록 정확성이 다소 떨어지는 단점이 있다.

## 3. 일방향재하시험

### 3-1. 가압 및 반력시스템에 따른 분류

#### 1) 사하중 이용방식

- ① 시험말뚝두부에 설계하중의 약 2.5배의 중량물을 적재하여 유 압잭에 의해서 각 단계별 시험하중을 작용하는 방식이다.
- ② 시험의 신뢰도가 높다.
- ③ 재하하중이 클 경우 재하물의 수급이 어렵고, 안전사고가 우려 되며, 가장 비경제적인 방식이다.
- ④ 정확한 주면마찰력을 예측해야한다.



[그림 2] 사하중 이용방식

#### 2) 반력말뚝 이용방식

- ① 시험말뚝 주변에 기 시공된 말뚝의 인발저항력을 이용하여 반 력시스템을 구성한 후 말뚝두부에 단계별 시험하중을 재하하는 방식이다.
- ② 사하중 이용방식보다 경제적인 방식이다.
- ③ 말뚝의 배열이 정방향이고 주면마찰력 분포가 가급적 균등해야한다.



[그림 3] 반력말뚝 이용방식

#### 3) 양가반력 이용방식

- ① 시험말뚝 주변에 기 시공된 말뚝이 없거나 충분한 반력을 얻을만 한 말뚝이 없을 때 별도로 양가를 설치하고 양가의 인발저항력을 이용하여 말뚝두부에 단계별 시험하중을 재하하는 방식이다.
- ② 어스양가에 의한 충분한 반력이 확보되어야 한다.
- ③ 인접에 기 시공된 말뚝이 없어도 재하시험이 가능하다.
- ④ 시험비는 사하중보다 경제적이거나 반력말뚝 이용방식보다 고가이다.
- ⑤ 불균등한 양가반력시 일부 양가에 응력집중에 따른 연속적인 양가의 파손이 우려된다.



[그림 4] 양가반력 이용방식

### 3-2. 시험방법

KS F 2445에 규정된 재하시험의 방법에 대한 종류 및 과정을 살펴보면 다음과 같다.

#### 1) 표준 재하 시험방법

- ① 총 시험하중을 8단계 즉, 설계하중의 약 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175% 및 200%로 나누어 재하한다.
- ② 각 하중 단계에서 말뚝두부의 침하율(Rate of Settlement)이 시간당 0.01inch (0.25mm)이하가 될 때까지, 단 최대 2시간을 넘지 않도록 재하하중을 유지한다.
- ③ 설계 하중의 200% 즉, 총 시험하중의 재하단계에서 하중을 유지하되 시간당 침하량이 0.01inch(0.25mm)이하일 경우 12시간, 그렇지 않을 경우 24시간동안 유지시킨다.
- ④ 총 시험하중을 설계하중의 25%씩 각 단계별로 1시간씩 간격을 두고 재하한다.
- ⑤ 만약 시험 중 말뚝의 파괴가 발생한 경우 총 침하량이 말뚝두부의 직경 또는 대각선 길이의 15%에 달할 때까지 재하를 계속한다.

#### 2) 급속 재하 시험방법

- ① 재하하중단계를 설계하중의 10~15%로 정하고 각 하중단계의 재하간격을 5~15분으로 재하한다.

註1 : ASTM에서는 재하간격을 2.5분으로 규정하고 있으나 그 시간동안 2~4 차례에 걸쳐 Gauge 또는 Scale 등을 읽고 기록하기에는 충분치 못한 것으로 판단되며 대체로 5분 간격으로 하는 것이 보다 실제적인 것으로 보인다.

- ② 각 하중단계마다 2~4 차례 (예 : 재하간격 5분일 경우 0, 2.5, 4, 5분 경과시 침하량을 기록한다.
- ③ 시험은 재하하중을 계속 증가시켜 말뚝의 극한하중에 이를 때까지 또는 재하장치의 재하용량이 허용하는 범위까지 재하한 후, 최종단계에서 2.5~15분간 하중을 유지시킨 후 재하한다.

註2 : 일반적으로 총 시험하중을 표준 재하 시험방법에서와 마찬가지로 설계 하중의 200% 혹은 300% 까지 재하하는 것이 권장되고 있다(Fellenius, Prakash). 이 방법을 사용하면 대략 2~5 시간 이내에 전 시험과정을 마칠 수 있다.

#### 3) 하중 증가 평형 시험방법

- ① 재하하중단계를 설계하중의 15~25%로 정한다.
- ② 각 재하하중단계에서 재하하중을 일정시간(5~15분)동안 유지

시킨 후, 하중-침하량이 평형상태에 도달할 때까지 재하하중이 감소하도록 방치한다.

- ③ “②” 항에서의 평형상태에 도달하면 다음 단계의 하중을 재하하는 식으로 같은 방식을 반복하여 재하하중이 총 시험하중에 이를 때까지 시험을 계속한다.

#### 4) 일정 침하율 시험방법

- ① 말뚝의 침하율이 통상 0.01~0.10inch/분(0.25~2.50mm/분)가 되도록 재하하중을 조절하면서 매 2분마다 하중과 침하량을 기록한다.

註3 : 침하율을 정하는데 있어 Whitaker는 마찰 말뚝의 경우 0.75mm/분, 선단지지 말뚝의 경우 1.5mm/분을 채택할 것을 권유하고 있으며, ASTM에서는 점성토인 경우 0.25~1.25mm/분, 사질토인 경우 0.75~2.5mm/분을 제시하고 있다.

- ② “①”의 방법에 의해 재하하중을 증가시켜 말뚝의 총 침하량이 2~3inch (50~75mm)에 달할 때까지 또는 총 시험하중에 도달할 때까지 시험을 계속한 후 재하한다.

註4 : ASTM에서는 총 침하량이 말뚝 두부의 직경 또는 대각선 길이의 15%에 달할 때까지 시험을 계속할 것으로 규정하고 있다. 이 CRP 시험방법은 급속 재하방법(Quick Maintained-Load Test)에서 보다 더 나은 하중-침하 곡선을 얻을 수 있는 장점이 있으며, 특히 점성토의 마찰말뚝에 대해 보다 잘 적용된다.

#### 5) 일정 침하량 시험방법

- ① 단계별 재하하중을 말뚝의 침하량이 대략 말뚝두부의 직경 또는 대각선 길이의 1%에 해당하는 값과 같아지도록 조절한다.
- ② “①” 항의 소정 침하량을 유지하기 위한 재하하중 변화율이 시간당 각 단계에서의 재하하중의 1% 미만에 이르게 되면 다음 하중단계로 옮겨간다.
- ③ 이러한 과정을 계속하여 말뚝의 총 침하량이 말뚝두부의 직경 또는 대각선 길이의 10%에 달할 때까지(또는 재하장치의 용량 한도까지) 시험을 계속한다.
- ④ 재하하중이 총 시험하중에 도달하면 소정 침하량을 유지하기 위한 하중의 변화율이 시간당 총 시험 하중의 1% 미만일 때까지 재하하중을 유지시킨 후 총 재하하중을 네 단계로 등분하여 재하하되, 재하 단계별로 말뚝의 Rebound율이 시간당 말뚝 두부의 직경이나 대각선 길이의 0.3% 이내에 들어올 때까지 기다린 후 다음단계의 재하를 행하도록 한다.

## 6) 반복 하중 재하 방법

- ① 재하하중의 하중단계는 표준재하 방법에서와 같이 정한다.
- ② 재하하중 단계가 설계하중의 50%, 100% 및 150%에 도달하였을 때 재하하중을 각 1시간 동안 유지시킨 후 표준재하방법의 재하 시와 같은 단계를 거쳐 단계별로 20분 간격을 두면서 재하한다.
- ③ 하중을 완전히 재하한 후 설계하중의 50%씩 단계적으로 다시 재하하고 표준시험방법에 따라 다음 단계로 재하한다.
- ④ 재하하중이 총 시험하중에 도달하게 되면 12시간 또는 24시간 동안 하중을 유지시킨 후 재하하중 그 절차는 표준 재하 시험방법과 같다.

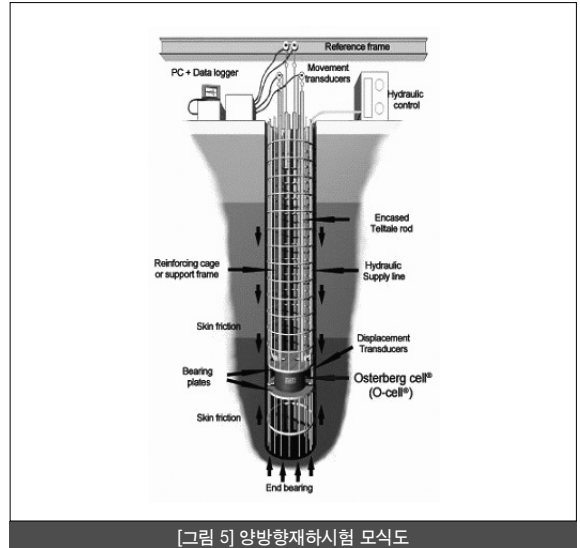
## 4. 양방향재하시험

### 4-1. 양방향재하시험의 개요

양방향재하시험은 시험하중이 매우 큰 대규모 현장타설 말뚝에서 경제적인 시험방법이다. 특수하게 제작된 고압의 유압 Jack을 일반적으로 말뚝 선단 가까이 설치하고, 말뚝의 자중과 주면마찰력을 이용하여 재하시험에 필요한 반력을 발생시켜 주면마찰력 및 선단지지력을 분리 측정한다. 지상에서 유압을 가하면 O-Cell의 하부는 하향으로 움직여 선단 지지력을 발생시키고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 주면마찰력을 발생시킨다. <표 1>은 시스템 구성이며, [그림 5]는 양방향재하시험의 모식도이다.

<표 1> 시스템 구성

장비명	규격 및 구성
Hydraulic Pump	<ul style="list-style-type: none"> <li>최고압력 : 30,000psi</li> <li>최대토출량 : 82.2 l /min</li> <li>물탱크 : 60 l</li> </ul>
압력측정시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>압력게이지 부착 (Bourdon pressure gauge, VW)</li> </ul>
O-cell	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\phi = 500 \sim 1,000(\text{mm})</math> 설계하중에 따라 결정(수량, <math>\phi</math>, L)</li> </ul>
O-cell 팽창변위시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>LVDT</li> <li>O - Cell 수량과 동일</li> </ul>
Hydraulic Supply Line	<ul style="list-style-type: none"> <li>In Line Tube</li> <li>Out Line Tube</li> </ul>
Telltale Casings & LVDT	<ul style="list-style-type: none"> <li>LVDT</li> <li>최대측정치 : 150mm</li> </ul>
Data Logger	<ul style="list-style-type: none"> <li>다 채널</li> </ul>



[그림 5] 양방향재하시험 모식도

### 4-2. 양방향재하시험의 장단점

양방향재하시험의 기존의 가압 및 반력시스템을 이용하는 일방향 재하시험과 비교하여 <표 2> 및 <표 3>과 같은 장단점이 있다. 양방향재하시험시 특이사항은 선단지지력과 주면마찰력을 분리측정 가능하나 선단지지력과 주면마찰력 중 어느 한쪽의 힘이 먼저 극한에 도달하면 시험이 종료된다. 또한 예측유류로 재하용량이 부족하거나 셀의 실린더 길이를 충분히 확보하지 못한 경우에도 시험이 종료된다.

<표 2> 양방향재하시험의 장점

경제성	별도의 지상반력장치가 필요없기 때문에 시험하중이 높을수록 경제적이다
시험용량	시험하중은 거의 반 무한대
지지력 분리측정	선단지지력과 주면마찰력 분리측정
안정성	별도의 하중전이시험이 필요없음 지상반력구조물이 없기 때문에 시험의 안정성이 높음 종래의 정재하시험으로 불가능한 해상 및 오만한 경사지 시험도 가능
작업공간	3m 이내의 공간만 있어도 시험가능
연속시험	말뚝의 Set up 혹은 에이징 효과 확인 가능

<표 3> 양방향재하시험의 단점

시험 전 설치	유압잭이 반드시 시공시에 설치되어야 함
시험의 종료	선단지지력 또는 주면마찰력 중 한쪽이 극한에 도달하거나 셀의 재하용량 및 실린더길이 한계에 도달하면 시험 종료
등가하중곡선	말뚝두부의 등가적정하중-침하곡선의 변곡점이 나타나지 않을 수도 있다.
경제성	100~200t정도의 작은 시험하중에는 오히려 비경제적
적용말뚝의 한계	H말뚝, 널말뚝, 나무말뚝에는 적용 불가
셀의 소모성	한번 설치된 셀은 소모품으로 재사용이 불가

## 5. 수평보강형 양방향재하시험

### 5-1. 수평보강형 양방향재하시험의 개요

기존의 양방향재하시험은 선단지지력 또는 주면마찰력 중 어느 한 쪽이 먼저 극한에 도달하면 나머지 지지력은 설계 및 극한하중을 확인할 수가 없는 기술적 한계를 가지고 있다. 수평보강형 양방향재하시험법은 이를 보완하기 위해 연직책을 중심으로 지지력의 크기에 따라 상부 또는 하부에 수평책을 이용한 별도의 내부반력장치를 장착함으로써 선단지지력 및 주면마찰력 모두의 참(True value)지지력을 확인할 수 있는 새로운 양방향재하시험법이다. [그림 6]은 수평보강형 양방향재하시험의 모식도이며, <표 4>는 시스템 구성이다.



[그림 6] 수평보강형 양방향재하시험 모식도

<표 4> 시스템 구성

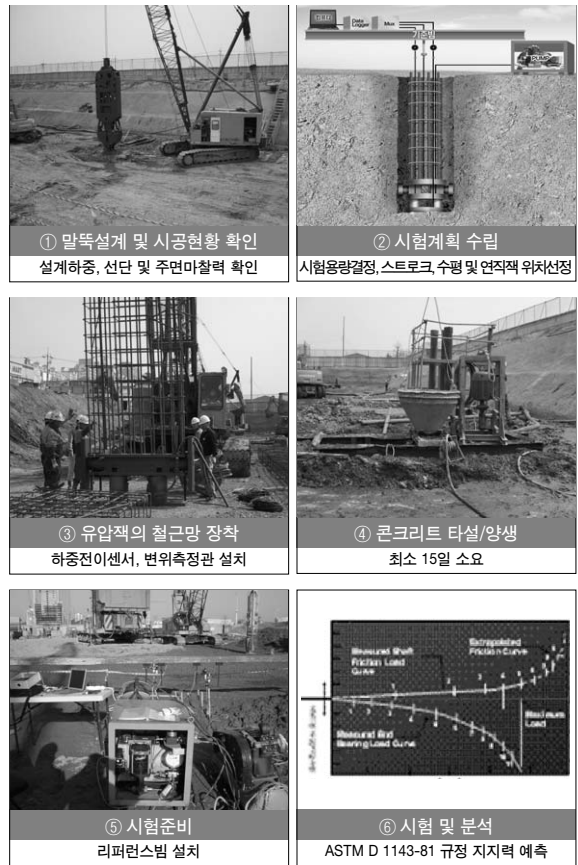
주요 장치명	목적	규격 및 구성
유/수압펌프	수평 및 양방향 Jacking system 작동펌프	최고 압력 7,200kg/cm <sup>2</sup> 최대 토출량 82.2L/min
양방향재하 Jacking cell	현장타설말뚝을 상향 및 하향방향으로 필요한 하중을 재하하는 장치	φ=200~850mm 실린더길이=100~250mm 수량=설계하중에 따라 복수
수평재하 Jacking cell	부족한 주면마찰력 또는 선단지지력을 유발하기 위한 장치	φ=100~500mm 실린더길이=150~300mm 수량=설계하중에 따라 복수
수평 재하 가압판	부족한 주면마찰력 또는 선단지지력을 확보하기 위해 공벽에 직접 가압하는 하중판	필요한 지지력의 크기에 따라 가압판의 면적 산정 하중판의 크기는 공벽의 파괴강도 이하가 되도록 설계
상향 및 하향 변위 측정 센서	재하시 말뚝의 상향 및 하향 변위를 지중에서 직접 측정하여 지상에 전송	최대 측정변위는 Jacking cell 의 최대 실린더길이에 준함

### 5-2. 수평보강형 양방향재하시험 절차

수평보강형 양방향재하시험의 절차는 [그림 7]과 같다.

기존 양방향재하시험과의 차이점은 시험계획 수립 시 시험용량을 고려하여 스트로크 수평 및 연직책의 위치를 선정하는 것이다.

이는 수평보강형 양방향재하시험의 장점인 지지력의 크기에 따라 상·하부 수평책에 의한 별도의 내부반력장치를 장착하여 선단지지력 및 주면마찰력 모두의 참(True value)지지력을 확인하기 위함이다.



[그림 7] 수평보강형 양방향재하시험의 설치 순서도



### 5-3. 수평보강형 양방향재하시험의 장점

수평보강형 양방향재하시험의 장점은 앞서도 언급한 내용과 같이 기존 양방향재하시험의 기술적 한계를 보완하기 위해 주면마찰력을 인위적으로 조절하여 향상시킬 수 있도록 함으로써 어떠한 지반조건하에서도 말뚝의 극한 선단지지력 및 주면마찰력을 측정할 수 있다는 것이다.

기존의 양방향재하시험의 장점을 모두 발휘하면서 가장 큰 단점으로 지적되었던 시험종료 시기를 보완하였다.

이는 말뚝재하시험의 목적이 대구경 현장타설말뚝의 극한하중을 확인하기 위한 목적으로 시행되는 경우 수평보강형 양방향재하시험이 그 장점을 발휘하여 현장에 적용될 수 있다.

### 6. 말뚝 재하 시험의 적용성

말뚝의 압축재하시험 방법을 선정할 때 시험방법의 장단점 및 신뢰도를 고려하여 정재하시험은 보다 중요한 시험에, 동재하시험은 일반 시험에 적용하는 것으로 구분하는 것이 일반적이다.

즉, 정재하시험은 침하량이 주요 문제인 현장, 소구경 현장타설말뚝의 시험현장, 지지력 감소(Relaxation)등이 일어날 수 있는 특수 지질조건과 관련된 현장, 동재하시험의 검증이 필요한 현장 등에서 한정된 수량에 대해 수행하고, 보다 많은 수량의 말뚝에 대해서는 동재하시험을 실시하는 것이 해당 현장의 전체적인 신뢰도를 위해서는 더욱 효율적이라는 점을 고려할 필요가 있다.

앞에서 소개한 양방향재하시험은 정재하시험(일방향)에 비해 반력 재하 시스템을 따로 설치하지 않으므로 공사기간과 비용을 단축시킬 수 있다. 그러나 양방향 재하시험은 단단한 층 위에 연약한 층이 놓여 있는 경우 비효과적이다. 양방향재하시험은 말뚝의 지지력 산정 시 유용한 수단이며 때로는 현장 상황에 따라 말뚝의 지지력을 산정하는 유일한 방법이 될 수도 있다.

반면, 양방향재하시험과 정재하시험에서 재하방식의 차이는 예상치 못한 오류를 발생시킬 수도 있다.

일반적으로 말뚝 재하시험 별로 경제성을 확보할 수 있는 적용설계하중은 <표 5>와 같다.

<표 5> 말뚝재하시험별 적용 설계하중

구분		적용 설계하중 (경제성 확보)
정재하시험 (일방향)	사하중 이용방식	200톤 미만
	주변반력 이용방식	200톤 미만
	양카반력 이용방식	500~1000톤 미만
양방향 재하시험		500톤 이상
동재하시험		모든 시험하중에 적용이 가능하나 설계하중이 증가할수록 정확도가 떨어짐

### 7. 말뚝재하시험의 최근 기술 동향

기성말뚝에 대한 재하시험은 정재하시험의 경우 KS F 2445에 의해 수행되고 있으며, 동재하시험의 경우 KS F 2591에 의해 수행되고 있다. 주택공사 시방서 및 구조물 기초설계기준(한국지반공학회, 2003) 등에서는 재하시험에 대한 시험횟수 및 진행방법에 대하여 언급되어 기성말뚝의 품질관리를 수행하고 있다. 그러나 최근 건축물이 초고층화되고 구조물의 대형화로 인해 말뚝이 대형화되어 기존의 재하시험 방법으로는 정확한 말뚝의 지지력을 확인하는데 한계에 도달하였다. 이에 대한 대책으로 양방향재하시험이 미국에서 개발되었고, 국내에서는 O-cell 시험과는 다른 양방향재하시험이 독자적으로 한국에서 개발되었다(최용규 등, 2005). 또한 기존의 양방향재하시험의 단점을 보완하여 특허를 받은 수평보강형 양방향 재하시험은 시험 성공률과 신뢰도를 향상시켜 경제적인 대구경현장타설 말뚝의 재하시험 방법으로 확대 적용될 것으로 기대된다. S