

동재하시험의 올바른 적용

A Proposal for the Proper Application of Dynamic Pile Loading Tests

홍 현성¹⁾, Hun-Sung Hong, 김 성희²⁾, Soung-Hoi Kim, 전 영석³⁾, Young-Suk Jun

¹⁾ (주)파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers

²⁾ (주)파일테크 차장, Senior Researcher, Piletech Consulting Engineers

³⁾ (주)파일테크 과장, Researcher, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Locally PDA has been utilized mainly as an alternative way of performing pile loading tests. More than 30 units of PDA's are believed to be operating in Korea. It is true that PDA can provide useful information regarding bearing capacity, integrity, hammer performance, time effect, etc. However it is also true that inappropriate execution of PDA could result in harmful effects for the safety of the superstructure or causing delay in the construction process. In this paper several cases of inappropriate application of PDA are introduced. Most of the problems seemed to be caused by unqualified personnel who carry out testing and analysis. From the evaluation of the cases a proposal has been made for the proper application of PDA.

Key words : PDA, pile bearing capacity, integrity, CAPWAP analysis

1. 서 론

말뚝항타분석기 (PDA, Pile Driving Analyser)는 말뚝의 지지력을 측정하는 목적으로 주로 사용되고 있어 일명 동재하시험기라고도 불린다. 우리나라에는 1994년도에 처음 도입된 이래 그 간편성과 장점이 널리 인식되어 현재에는 약 30여대가 보급되어 각종 말뚝기초의 시공관리에 사용되고 있다. 이처럼 PDA가 폭넓게 보급됨에 따라 초기의 단순한 지지력 측정목적외에 말뚝의 항타시공 관입성(driveability), 항타장비의 적합성, 말뚝재료의 건전도, 지반조건, 군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 (heaving), 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화 등 말뚝기초 전반의 주제들까지 검토할 수 있게되어 국내말뚝기초 관련 기술 수준 향상의 토대가 되었다. PDA의 보급 확산은 이러한 긍정적인 효과와 함께 부정적인 영향도 초래하고 있다. 가장 심각한 문제점은 말뚝기초 및 파동이론에 대하여 합당한 이론적 배경을 갖지 못한 기술자들에 의하여 PDA 시험이 실시 된다는 것이다. 적절하지 못한 PDA 시험은 지지력이 미달하는 말뚝의 지지력을 과대 평가 하거나, 지지력이 양호한 말뚝을 지지력이 미달하는 것으로 판정하기도 하며, 재료가 손상된 말뚝을 건전하다고 평가하며, 건전한 말뚝을 재료가 손상된 것으로 판정하는 등 전체 구조물 건설에 치명적인 악영향을 초래하게된다. 또한 이와 같은 판정 오류는 전체 공사추진에 심각한 차질을 주기도 한다. 본논문에서는 국내에서 조사된 이러한 적절하지 못한 PDA 시험사례들을 분석 소개하고 PDA 시험의 올바른 활용 방안을 제시하였다.

2. PDA의 부적절한 적용사례

우리나라에서 그간 조사된 적절하지 못한 PDA 적용사례는 기본자료(말뚝길이, 말뚝단면적, 동재하시험에 사용하는 게이지상수, 지반요소 등)의 입력 오류, 검증(calibration)유효기간이 경과한 게이지 사용,

게이지 부착 오류, CAPWAP분석 오류 등 다양한 유형으로 나타나고 있다. 이러한 오류들은 시공된 말뚝의 품질을 심각하게 오도할 수 있다. 본논문에서는 국내에서 조사된 여러 사례들 중 가장 대표적인 몇 개의 사례들을 소개하였다. 그러나 PDA 시험은 지나치게 전문적인 내용이며 지면이 제약되어 있는 관계로 극히 개략적으로 설명하였다.

2.1 사례(1)

사례(1)은 약 15m정도의 모래자갈 및 호박돌로 구성된 충적층 하부에 이암지층이 존재하는 지반에 $\phi 508\text{mm} \times 9\text{mm}$ 강관말뚝을 DKH7 유압해머로 직항타 시공하는 공사에서 항타시 동재하시험(EOD)이

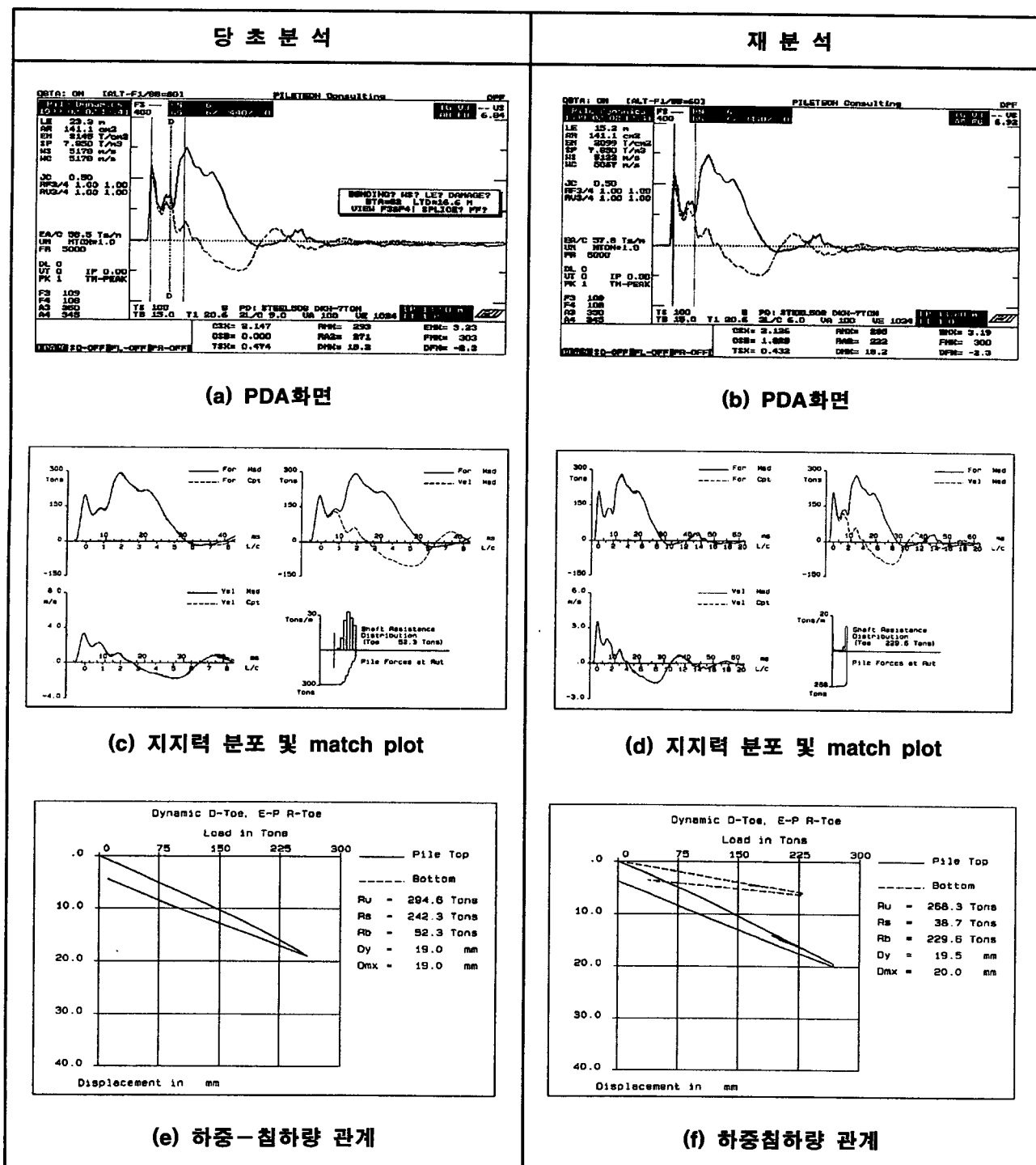


그림 1 PDA 시험결과의 비교

실시되었다. 지반조사 내용에 의하면 충적층에서의 주변마찰력은 그리 크지 않을 것으로 예상되었다. 그러나 시공시 실시된 PDA시험은 심각한 오류들이 나타나고 있다. 우선 그림 1(a)에 나타난 PDA측정 화면상 LTD=16.6m에 BTA=82인 말뚝재료 손상이 발견되었다. CAPWAP분석결과는 그림 1(c)에 나타난 바와 같이 match상태는 대체로 양호한 것처럼(MQno=2.16) 보인다. 말뚝의 지지력 분포는 6m 아래쪽에서 상당히 큰 주변마찰력이 나타나고 있으며 선단부로 갈수록 감소하여 마치 마찰지지말뚝인 것으로 해석된다. 이 시험을 실시한 기술자에 의해 제출된 CAPWAP분석결과에 의한 하중-침하량 관계(그림 1(e))에 나타난 바와 같이 주변마찰력은 242.3ton으로 전체지지력 294.6ton의 82.2%에 달하고 있다. 그러나 이 시험결과는 사실 말뚝길이를 잘못 입력한 것에서 기인한다. 실제 공사에 사용된 말뚝길이는 입력된 23.3m가 아니라 15.2m 이다. 이에 따라 선단부에 전달된 압축응력(CSB)은 그림 1(a)의 측정된 시험결과와 같이 0.00이 아니라 입력오류를 정정하여 다시 작성한 그림 1(b)에 나타난 것처럼 1.828t/cm^2 이 되어 에너지가 선단부까지 충분히 전달되었음을 알 수 있다. 이밖에 시험자는 강관말뚝의 wave speed의 입력상 오류를 범한 것으로 확인되었다. 이러한 입력오류들을 수정한 결과 측정화면은 그림 1(b)에 표시한 것처럼 말뚝재료손상 경고가 나타나지 않고 정상적인 분석이 가능하였다. 입력자료를 수정한 파의 정상적인 CAPWAP분석결과는 그림 1(d)에 표시하였으며, 이를 토대로한 하중-침하량 관계는 그림 1(f)에 나타내었다. 이 분석결과에 의하면 말뚝의 선단지지력은 229.6ton으로 전체 지지력 268.3ton의 85.6%가 되며 이는 지반조건과도 일치하는 전형적인 항타시 동재하시험(EOID) 결과를 나타내 준다. CAPWAP 분석에 있어서도 시험 기술자는 지나친 filtering으로 측정된 파를 왜곡하였으며 양쪽 게이지간에 30% 이상의 지나친 편차를 보이는 타격장비의 문제점을 현장에서 교정하지 않았던 문제점도 발견되었다. 이 사례에서 나타난 것과 같이 입력오류는 말뚝품질 판단에 치명적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

2.2 사례(2)

사례(2)는 그림 2에 표시한 지반조건에서 $\phi 406\text{mm} \times 12\text{mm}$ 강관말뚝을 NH70 유압해머로 직항타하는 경우에서 조사되었다. 말뚝의 관입깊이는 34.8m로 매우 길며 PDA는 항타후 19일이 경과한 시점에 실시되었다. 시험결과는 충분한 지지력이 분석되어 아무런 문제가 없는 것으로 보고되었다. 이 말뚝에 대하여는 시공후 2개월이 경과한 시점에 정재하시험이 실시되었는데 정재하시험 결과 역시 설계하중조건을 만족시키는 것으로 보고되었다. 그러나 PDA시험결과와 정재하시험결과를 함께 표시해 보면(그림 3) 중대한 문제가 나타난다. 정재하시험은 동재하시험이 실시된 시점보다 적어도 1개월 이상의 기간이 경과한 시점에 실시되었다. 일반적으로 항타말뚝의 지지력은 시공후 경과한 시간에 따라 변화하며 이현장의 경우에는 시간이 경과함에 따라 지지력이 증가하는 것으로(set up) 알려져 있다. 그러나 그림 3의 결과는 시간이 경과함에 따라 지지력이 감소하는 것(relaxation)으로 분석되고 있다. 이는 구조물의 장기적인 안전에 치명적인 위해가 될 수 있는 내용이지만 관련자들이 간과하였다. 이 시험 결과는 추후 정밀검토한 결과 CAPWAP분석에서 항타로 인한 잔류응력(residual stress)을 고려하지 못하였기 때문인 것으로 밝혀 졌다. 잔류응력을 고려한 CAPWAP해석 결과는 당초 분석결과보다 낮은 지지력을 나타내 주며 따라서 이 현장에서는 시간이 경과함에 따라 지지력이 감소하는 현상은 나타나지 않는 것으로 판명되었고 공사는 원활히 진행될 수 있었다. 이 사례가 시사해 주는 점은 단순히 동재하시험의 분석오류 뿐만 아니라 실무기술자들에게 말뚝에 대한 이해가 요구됨을 알 수 있다.

2.3 사례(3)

사례(3)은 현장의 주변여건상 말뚝을 항타할 수 없기 때문에 지반을 $\phi 550\text{mm}$ 의 오거로 선굴착하고 $\phi 457\text{mm} \times 8\text{mm}$ 강관말뚝을 삽입한 후 1내지 2회 경타를 실시한 공사에서 PDA가 실시된 경우이다. 현장의 지반조건은 지표면으로부터 약 30m깊이까지 연약한 실트질토래 및 실트질점토층이 존재하고 그하부에 이암층이 나타난다. 말뚝의 선단지지층은 지표면으로부터 약 40m깊이가 되는 것으로 판단하여 이 깊이까지 선굴착을 실시하였다. 말뚝을 시공한 후 어느정도 시간이 경과한 다음 정재하시험을 실시하였는데 55.6ton 하중 재하시 35mm의 침하량이 측정되어 극한상태에 도달한 것으로 판단하고 시험을 중단하였다. 이에 정재하시험을 실시한 후 16일이 경과한 시점에 동일말뚝에 대하여 PDA시험이 실시되었

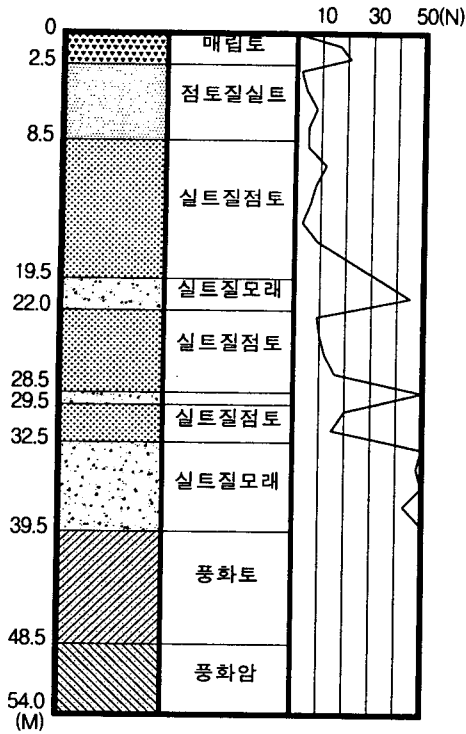


그림 2 지반조건(사례2)

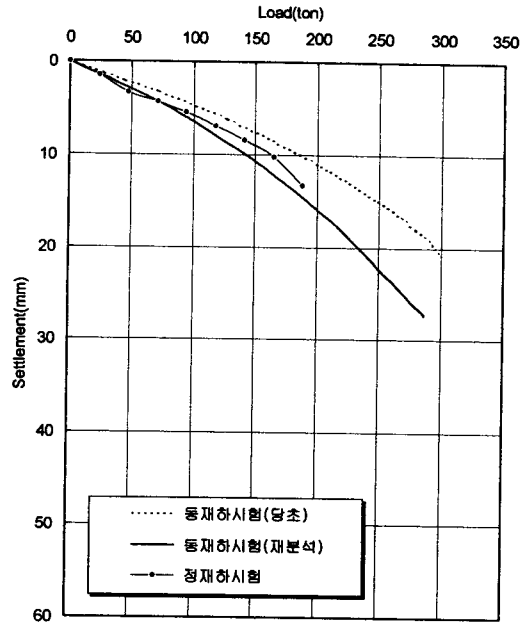


그림 3 말뚝재하시험 결과 비교(사례2)

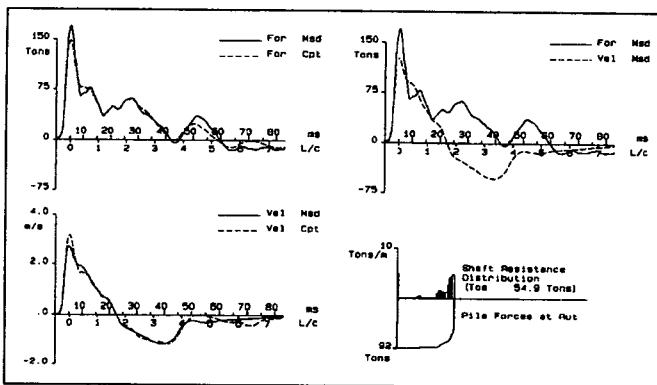


그림 4 CAPWAP 분석 결과

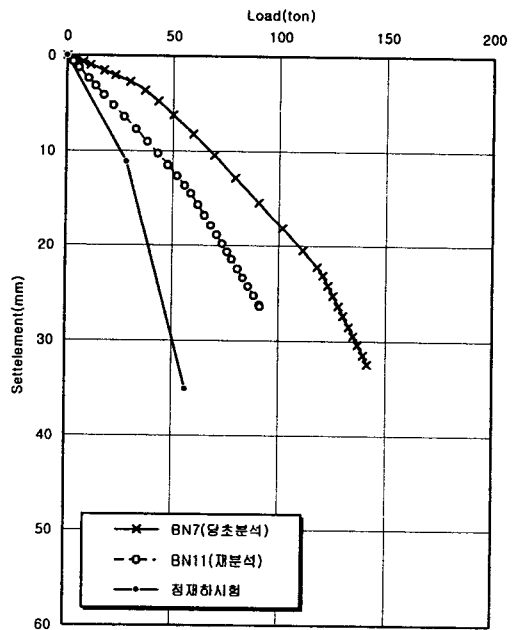


그림 5 말뚝재하시험 결과 비교(사례3)

다. CAPWAP분석 결과는 그림 4에 나타난 바와 같으며 이로부터 말뚝의 허용지지력은 70ton 정도가 된다고 판단하였다. 이와같은 상황이라면 대책수립은 자명하다. 당연히 정재하시험 결과를 토대로하여 보강대책이 수립되어야 하지만 현장에서는 지지력상 유리한 결과를 나타내고 있는 것으로 믿어지는 동재하시험을 기준으로 대책을 검토하였다. 이에 PDA시험내용을 정밀검토하게 되었다. 그림 4에 나타난 바에 의하면 CAPWAP분석의 match상태는 MQno가 1.99로 양호한 것처럼 보인다. 그러나 PDA측정 화면상에는 LTD=27.7m에서 BTA=76의 재료손상이 나타난다. 말뚝의 시공방법과 지반조건을 고려할 때

이와같은 재료손상은 납득하기 어렵다. 이는 측정된 force파와 velocity파의 proportionality가 맞지않고 force파가 불안정한 형태를 나타내어 impedance가 변화한 것처럼 해석되었기 때문이다. 주된 원인은 시공방법상 말뚝직경보다 100mm 큰 선굴착공내에 긴 말뚝이 삽입되어 극심한 편타가 발생된 때문이다. 실제로 CAPWAP 분석에 사용된 파는 게이지간 30%이상의 차이가 나타나고 있다. 이와같이 극심한 편타가 나타나는 데이터를 분석하였기 때문에 말뚝의 지지력분포는 그림 4에 나타난 것과 같이 선굴착구간에서 비교적 큰 주면마찰력이 있는 것처럼 해석되었다. 그결과 시험말뚝은 110.4ton의 가공의 주면마찰력을 갖는 것으로 분석되고 전체지지력은 과대평가 되었다. 본말뚝의 지지력을 재평가하기 위하여 측정된 PDA 데이터중 편타가 비교적 나타나지 않는 파를 재선정하고 proportionality를 조정한 후 CAPWAP분석을 시행하였다. 분석결과 말뚝전전도는 양호하고 주면마찰력은 하단부에만 나타나며 그크기도 44.1ton에 불과하다. 그림 5에는 정재하시험과 당초의 CAPWAP분석결과 그리고 재선정한 파에 대한 CAPWAP분석결과에 의한 하중-침하량 관계를 함께 도시하였다. 여기에서도 동재하시험결과가 정재하시험 결과보다 지지력이 큰 것으로 나타난 이유는 동재하시험을 위하여 유압해머로 11회 타격을 가한 것이 말뚝선단부를 추가항타하여 좀더 견고한 지반까지 관입시킨 영향이 반영되었기 때문으로 판단된다. 이 사례에서는 동재하시험과 정재하시험의 관계를 이해하지 못하여 잘못 시행된 PDA결과를 과신하여 문제를 야기 시켰다. 그러나 보다 근본적인 원인은 PDA를 시행하고 분석하는 기술자들이 PDA의 기본원리에 대하여 무지하여 편타발생을 방치하였으며, 시험의 기본인 proportionality조건을 만족시키지 못하였고, CAPWAP해석 능력이 결여되어 심각한 건설재해를 초래할 수도 있었던 사례이다.

2.4 사례(4)

오거를 사용하여 지반을 선굴착하고 굴착공내에 시멘트풀을 주입한 다음 기성말뚝을 삽입한 후 최종 항타를 시행하는 SIP, SAIP, PRD등 공법에서는 시멘트풀 양생조건 및 지반조건에 따라 PDA시험시 나타나는 특성은 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 지금까지의 경험에 의하면 이러한 방법으로 시공된 말뚝들의 특성은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- (1) 시멘트풀 양생으로 인한 주면마찰력이 거의 발휘되지 않아서 선단지지된 직항타 말뚝과 같은 거동을 보이는 경우
- (2) 시멘트풀 양생으로 주면마찰력이 증가하는 경우
- (3) 시멘트풀이 말뚝벽면 주위에 부착되어 말뚝의 형상까지 변화하는 경우
- (4) 시멘트풀 주입효과가 말뚝의 선단지반까지 강화시키는 경우
- (5) radiation damping 모델이 적용되는 경우

실제로 (1)의 경우를 제외하고는 대부분 두세가지의 경우가 혼합된 형태로 나타나고 있으며 따라서 실제상태를 정확히 파악하여 PDA시험 결과를 분석하기는 거의 불가능하다고 하여도 과언은 아니다. 가장 큰 원인은 시멘트풀 양생으로 형성된 soil-cement의 형태가 매우 불규칙하며 그의 비중이나 강도 등을 측정할 수 없기 때문에 CAPWAP분석에 필수적인 모델링이 곤란하다는 것이다. 다행히 이러한 문제점은 CAPWAP 프로그램에 포함되어 있는 불규칙단면 또는 손상부위를 보정하는 용도로 사용되는 impedance 조정기법을 적용하여 대부분 해결할 수 있다. 다만 이의 적용에 있어 실제 지지력(마찰력) 및 damping 등과 구분하기 위해서는 많은 경험을 바탕으로 한 고도의 전문성이 요구된다.

사례(4)는 이러한 저공해공법 적용시 나타나는 문제점들 중 대표적인 것을 설명하였다. 그림 6과 같은 지반에 $\phi 400\text{mm}$ PHC말뚝을 SIP공법으로 시공하였다. 선굴착은 N값이 50정도인 깊이까지 실시하였으며 말뚝은 10.5m까지 시공되었다. 말뚝이 시공된지 7일이 경과한 시점에 램중량이 3.4ton인 드롭해머를 사용하여 동재하시험을 실시하였다. CAPWAP분석결과는 그림 7에 표시한 바와 같다. 말뚝의 지지력은 주면마찰력과 선단지지력이 모두 양호한 것으로 분석되었으며 설계하중조건도 만족시키고 있다. 그러나 본분석 결과를 세부적으로 검토하면 주면마찰력이 지표면 부근에서 가장 크고 깊이가 깊어질수록 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 6에 표시한 지반조건과는 명백히 차이가 있다. 이와같은 동재하시험 분석상의 문제점은 PDA실시후 14일후에 정재하시험을 실시함으로써 더욱 분명하게 나타나게 되었다. 정재하시험 결과는 14일전 실시한 동재하시험 결과보다도 지지력이 낮은 것으로 판명되었다. 일반적으로 시멘트풀을 주입한 말뚝에서는 양생기간이 경과함에 따라 지지력이 증가한다. 그러나 본 시험과같이

시간이 경과함에 따라 지지력이 감소하는 (relaxation) 경우는 있을 수 없다. 이에 동재하시험 내용을 정밀 분석하게 되었다. 조사결과 PDA시험자는 force와 velocity간의 proportionality를 조정하지 않았으며 CAPWAP분석시 직항타 말뚝과 같은 통상적인 모델인 Smith모델을 사용하였다. 그결과 주면마찰력 분포가 말뚝두부에서 가장 큰 것으로 분석되었으며 전체지지력 또한 과대평가하게 되었다. 같은 데이터를 proportionality를 조정하고 radiation damping 모델, 그리고 soil-cement 형성에 의한 부분적인 impedance 조정등을 병용하여 재분석하였다. 분석결과는 그림 8에 나타내었는데 주면마찰력 분포는 말뚝두부에서부터 선단부 쪽으로 점차 증가하는 것으로 나타나 지반조사 내용과도 일치한다. 또한 재분석한 결과와 정재하시험 결과를 비교해 보면(그림 9) 정재하시험에 의한 지지력이 약간 큰 것으로 분석되어 동재하시험 실시 시점으로 부터 정재하시험 실시 시점까지 경과한 시간 동안 지지력이 약간 증대되었음을 알 수 있다. 이 사례에서도 PDA를 실시한 기술자가 선굴착공법으로 시공된 말뚝의 지지력과 거동 특성에 대하여 무지하였기 때문에 상당한 공기지연을 초래하였다.

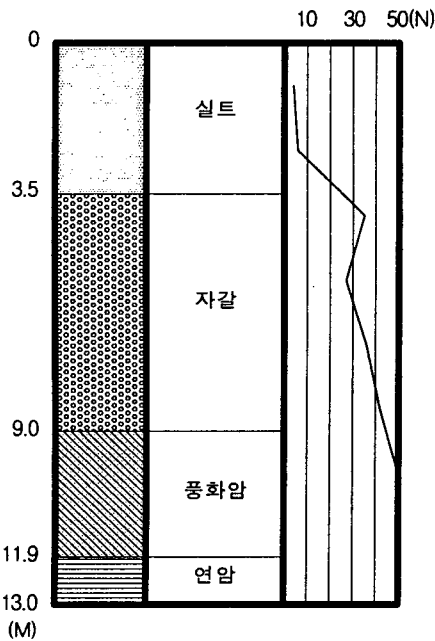


그림 6 지반조건 (사례 4)

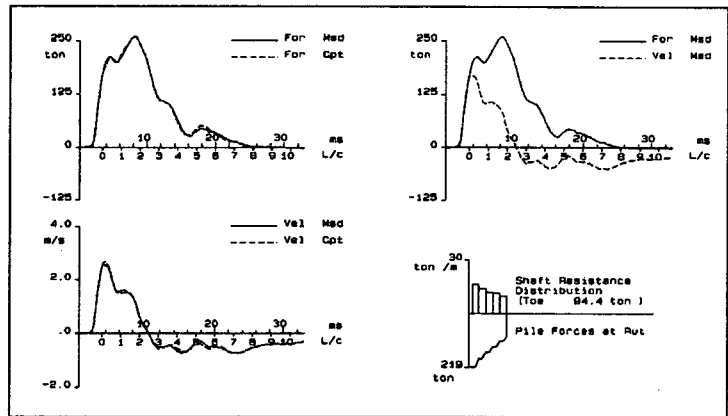


그림 7 CAPWAP분석결과 (당초 시험자)

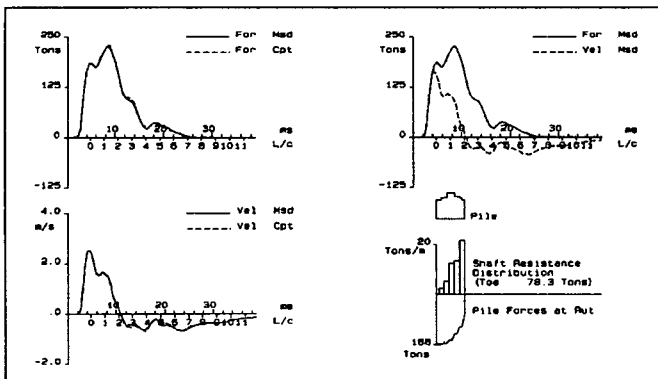


그림 8 CAPWAP분석결과 (재분석)

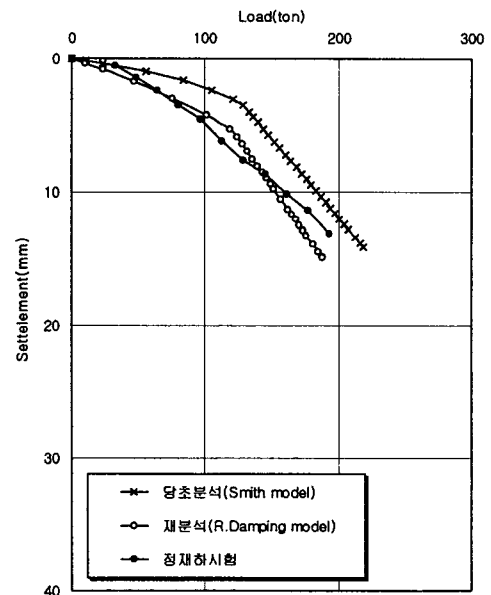


그림 9 말뚝재하시험결과 비교 (사례 4)

2.5 사례(5)

사례(5)는 현장주변여건상 말뚝을 향타하지 못하고 선굴착공법이 채택된 경우이다. 그러나 그림 10에 나타난 바와같이 지반조건상 선굴착시 굴착공벽이 붕괴하였기 때문에 강관케이싱을 사용한 SAIP공법이 채택되었다. 오거 외경이 700mm인 강관케이싱으로 선굴착을 실시한 다음 시멘트풀을 주입하고 Ø 400mm PHC말뚝을 삽입한 후 드롭해머로 최종경타를 실시하였다. PDA시험은 시멘트풀 양생을 고려하여 시공후 약 10일 내지 15일이 경과한 시점에 실시하였다. 당초 시험자가 측정된 PDA화면은 그림 11에 표시하였다. 그러나 측정된 파의 분석시 분석이 난해하여 파의 앞부분만을 분석하고 뒷부분은 임의로 삭제하였다. 그 결과 말뚝의 허용지지력은 설계된 80ton 에 미치지 못하는 것으로 보고되었다. 이 시험결과는 정밀 재분석해 본 결과 삭제된 부분의 선단지지력이 추가되어 설계하중조건을 만족시키는 것으로 확인되었다. CAPWAP분석에 의한 말뚝 지지력은 표 1에 나타내었으며, 그림 11에는 하중-침하량을 비교하였다. 이 사례가 시사해주는 점은 부적절한 PDA시험은 말뚝의 지지력을 심각하게 과소평가할 수 있다는 것이며 그로인하여 불필요한 낭비까지 초래할 수 있다는 것이다.

표 1 말뚝 지지력 분석 비교

구분	주면마찰력(ton)	선단지지력(ton)	전체지지력(ton)
당초분석	95.9	12.0	107.9
재분석	90.9	84.9	175.8

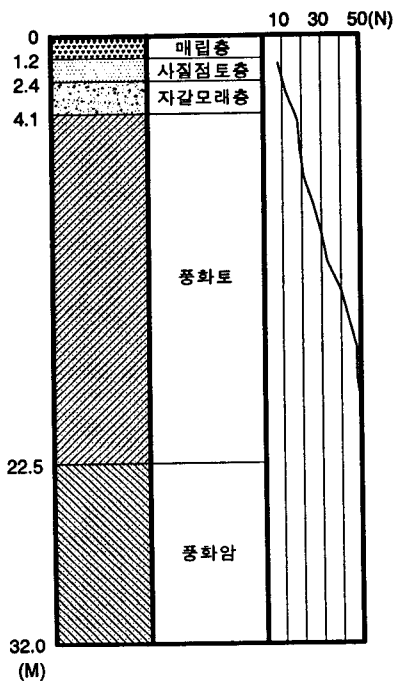


그림 10 지반조건 (사례 5)

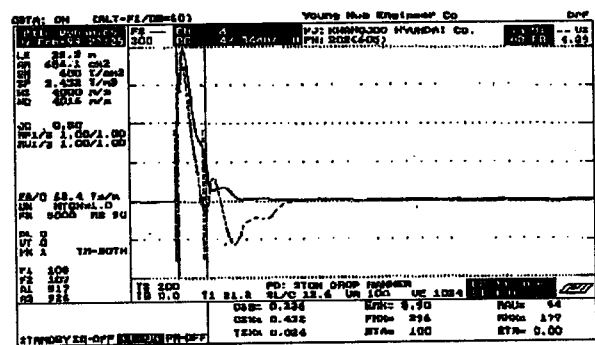


그림 11 PDA 화면 (사례 5)

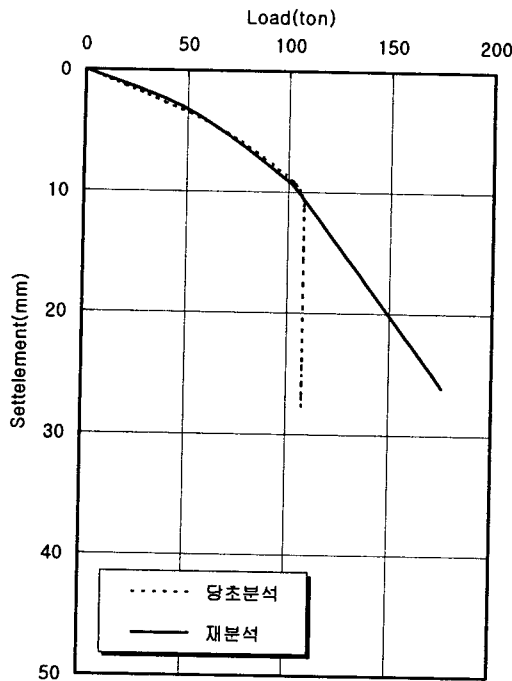


그림 12 말뚝재하시험 결과 분석 비교 (사례 5)

3. 올바른 동재하시험을 위한 제안

본 논문에서는 그간 국내에서 조사된 적절하지 못하게 수행된 동재하시험 사례들 중 극히 일부분만을 소개하였다. 이미 언급한 바와 같이 적절하지 못하게 동재하시험이 실시됨으로 인하여 품질이 부실한 말뚝들이 양호한 것으로 판정되기도 하였으며 문제가 없는 공사에서 보강공사를 하기도 하였을 것이다. 부실한 동재하시험은 결국 기초공학에 종사하는 기술자들의 신뢰를 크게 손상시키고 공사비 낭비 나아가 재해까지도 유발시킬 수 있다. 이를 해소하기 위해서는 무엇보다도 동재하시험을 실시하는 기술자들의 자질을 향상시켜야 하겠지만 이는 현실적으로 어려운 문제이다. 이를 미연에 방지하기 위해서는 현장의 기술자들이 동재하시험 결과를 판단할 수 있을 정도의 기본지식을 갖고 있어야 하겠지만 이또한 용이하지 않은 문제이다. 결국 우리나라의 동재하시험 기술수준 향상을 위해서는 상당한 시간을 갖고 시험기술자와 일반기술자들에 대한 지속적인 교육이 되어야 할 것이다. 이러한 교육의 성과가 가시화될 때까지는 당분간 아래와 같은 과정을 엄격하게 지켜 예상치 못한 문제점을 방지시킬 것을 제안한다.

(1) 일반 기술자들로서는 동재하시험 실시 기술자의 자질을 판단할 수 없는 실정이다. 따라서 해당공사에서 동재하시험을 실시할 경우에는 동일말뚝에 대하여 동재하시험과 정재하시험을 반드시 병행하여 시험 기술자의 자격을 검증하도록 한다. 이때 시험순서는 동재하시험을 먼저 실시하고 분석결과를 제출한 후 정재하시험을 실시하도록 한다.

(2) 많은 경우 잘못된 동재하시험을 실시하고도 사후에 검증이 어려운 이유는 시험자가 측정 데이터를 제출하지 않기 때문에 정확한 문제점을 파악할 수 없다. 따라서 동재하시험 보고서를 제출받을 때에는 시험시 측정된 데이터를 반드시 첨부하여 사후 검증이 가능하도록 조치한다.

이와같은 조치는 어디까지나 임시방편에 불과하다. 그러나 최근 동재하시험은 단순히 말뚝의 지지력만을 판단하는 용도에서 시공법의 적합성판단, 시공장비의 적합성판단, 시공관리기준 결정, 지반조건의 이상여부 판단 등으로 다양화 되고 있는 추세로 그 중요성이 더해가고 있는 실정이다. 잘못 판단된 시공법이나 시공관리 기준을 적용하여 상당한 공사를 진행시킨 상태에서 추후 이를 발견하고 대책을 강구할 수밖에 없었기 때문에 엄청난 대가를 치른 경우도 드물지 않다. 이러한 부작용을 방지하기 위해서는 공사진행상 어려움이 있더라도 본논문에서 제안한 대책을 실시하여야 할 것이다.