

표준관입시험을 통한 파동방정식 지반정수 산정법

Determination of Wave Equation Soil Constants by Standard Penetration Test

김 범 상*¹ Kim, Bum-Sang
김 기 영*² Kim, Ki-Young
조 성 민*³ Cho, Sung-Min

Abstract

There are some previous studies on the determination wave equation soil constants by SPT. However, methods suggested in previous researches had such analytical defects as the non-uniqueness of solutions, long-time consuming in computation, and lacking of accuracy due to the limit of available point values in time domain. In this paper, a modified procedure is proposed to improve the accuracy of determination of wave equation soil constants. It is based upon the least-error approach which minimizes the sum of errors between the measured and the recalculated wave values in total time domain. Finally, its applicability was verified by analyzing measured data presented on the released references.

요 지

말뚝의 파동방정식 해석에 사용되는 지반의 동적 물성치를 구하는 방법으로, 표준관입시험에서 얻은 가속도, 하중 파형을 분석하여 이를 얻고자하는 연구들이 기존에 진행되었다. 그러나 기존의 지반 정수 획득 절차는 해의 유일성을 보장하지 못하고 과도한 계산 시간이 소요되거나, 시간 영역에서의 몇 개의 점으로부터 지반 정수를 획득함으로써 전체 파형에 대한 객관성이 부족하다는 단점들을 가지고 있다. 본 논문에서는 전시간 영역에 걸친 획득 파형과 계산 파형의 오차를 최소화하고자 하는 최소 오차법을 기반으로 하여 앞에서 언급한 기존 절차의 단점을 개선한 새로운 지반 정수 획득 방법을 제안하였으며 문헌상에 나타난 계측 자료 및 현장 실측 하중, 가속도 계측 자료를 비교 분석하여 그 적용성을 고찰하였다.

Keywords : Standard penetration test, Wave equation, Soil constants

1. 서 론

표준관입시험(Standard Penetration Test, 이하 SPT)은 시추공 내에서 샘플러가 일정한 타격 에너지에 의해 일정 깊이를 관입하는 데 필요한 타격 회수를 구하여 지반의 강도, 흙의 상대밀도와 내부마찰각 등의 토질정수

추정하며, 동시에 교란시료를 얻을 수 있는 원위치 시험방법으로서, 절차의 간명함, 수많은 데이터의 축적, 비용의 저렴함 등으로 인하여 세계 각국에서 폭넓게 사용되고 있으며, 국내 대부분의 토목, 건축 공사 계획시 통상적으로 실시되고 있다. 지반조사에서 SPT가 차지하고 있는 이러한 중요성에 따라, 본 시험법의 영향 인

*1 정회원, SK건설 연구소 선임연구원 (Member, Senior researcher, R&D Center, SKEC, bskim-b@skec.co.kr)

*2 SK건설 연구소 주임연구원 (Junior researcher, R&D Center, SKEC)

*3 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원 (Member, Chief Research Engineer, Korea Highway Corporation)

자 규명, 에너지 효율 측정 등의 연구가 국내외에서 지속적으로 수행되고 있다(이명환, 1991; 이우진 등, 1998; 이호춘 등, 1996; Yokel, 1989; Kovacs 등, 1982; Sy 등, 1991).

많은 연구 사례들 중에서, SPT의 활용도 증대를 위한 방편으로서 SPT의 동적관입특성에 주목하여, 가속도, 하중 계측을 통해 지반의 동적 물성치를 획득하려는 시도가 이루어졌다. Schmertmann(1978)은 SPT를 통하여 구할 수 있는 지반의 동적 물성치로 말뚝의 파동방정식 해석을 위한 감쇠계수, 지반 액상화에 대한 안전율, 전단파 속도 등을 언급하였다. SPT 샘플러의 타입 문제는 말뚝 타입 문제와 유사하게 취급할 수 있으며, 두 문제 모두 일차원 로드(rod) 시스템에 대한 해머 충돌로 인하여 말뚝 또는 샘플러가 지반을 관입하게 되고, 말뚝 또는 로드를 통한 응력파의 전달 및 지반의 동적 저항 특성에 의하여 관입 거동이 제어되는 특징을 가지고 있다. 현재 파동방정식 해석에 사용하는 지반정수의 실용화된 시험법이 존재하지 않기 때문에, 주로 에너지 효율의 평가를 위해 사용되는 SPT의 동적계측을 통하여 파동

방정식 해석을 위한 지반정수들을 산정할 수 있다면 SPT의 활용도를 증대시킬 수 있으리라 판단된다. 이러한 이유로 인해 SPT 또는 강봉타입시험에 대한 동적계측을 통해 파동방정식 지반정수들을 획득하려는 시도가 계속적으로 이어져오고 있다(Goble 등, 1992; Aboumatar 등, 1996; Liang, 1991; Liang 등, 1993). 본 논문에서는 기존에 보고된 SPT를 통한 파동방정식 지반정수 산정법에 대한 고찰을 통해 보다 개선된 절차를 제시하였고 SPT 수행중의 가속도, 하중 계측을 통해 얻은 현장 데이터의 분석에 적용하였다.

2. SPT 수행시 파의 거동

2.1 파의 거동

SPT 수행시 해머가 SPT 로드(rod)의 상부를 타격하게 되면 응력파가 발생하게 되고 이러한 응력파는 로드(rod)를 타고 하향으로 전파되어 샘플러의 관입에 필요한 에너지를 전달하게 된다. 이러한 일련의 거동은 그림 1에서와

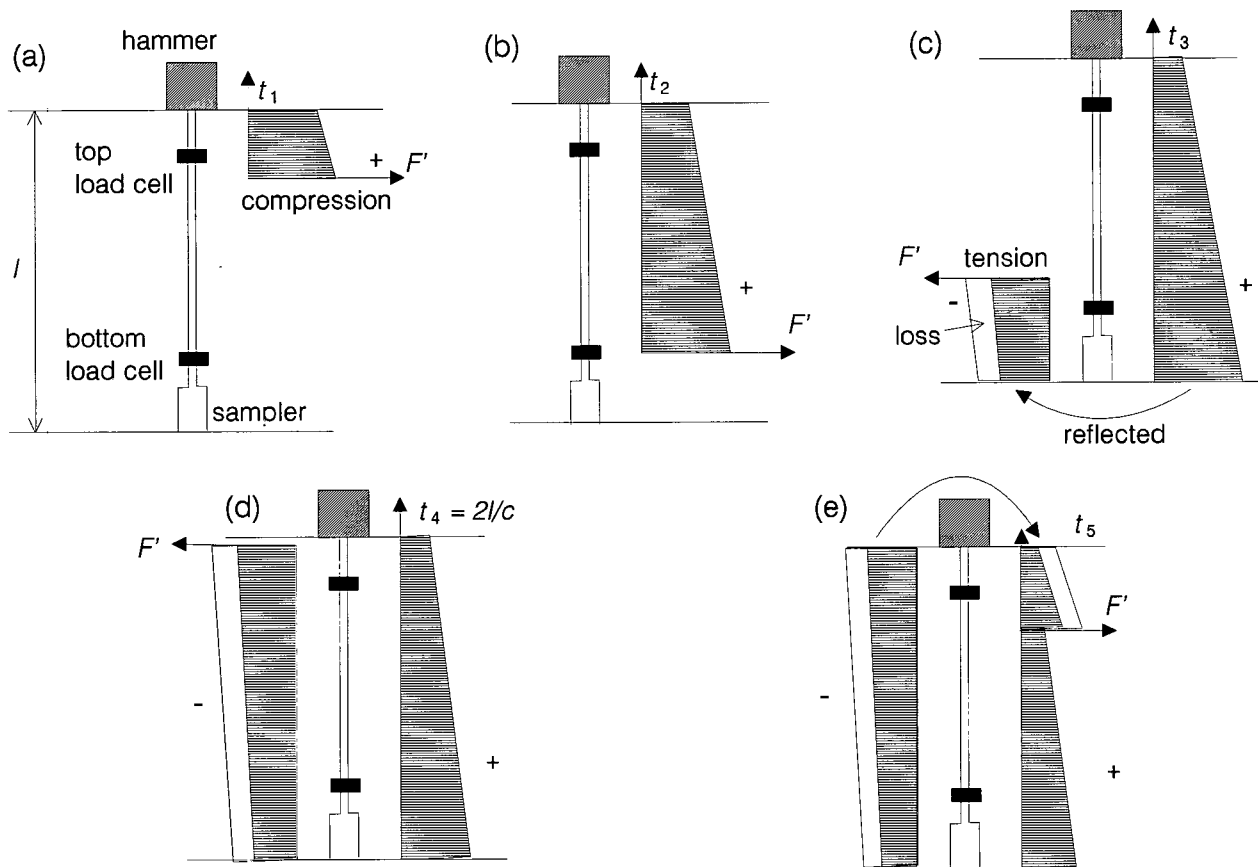


그림 1. 응력파의 전달에 대한 개념도

같이 개념적으로 나타낼 수 있다(Schmertmann 등, 1979). 그림 1(a)는 해머 타격후 시간 t_1 일때 파의 최대치가 상부 로드셀을 통과하는 것을 나타낸다. 그림 1(b)는 시간 t_2 일때 파의 최대치가 하부 로드셀에 도달하는 것을 나타내며 이때 샘플러에는 아직 해머 타격에 의한 영향이 미치지 않는다. 그림 1(c)는 시간 t_3 일때 파의 선두부가 인장파로 반사되어 로드와 상부로 전달되는 것을 보여준다. 이때 샘플러에 타격 에너지가 전달되고 지반 관입이 시작된다. 따라서 파의 에너지가 소산되고 응력파의 진폭이 감소한다. 하부 로드셀은 반사파의 선두부와 도달하고 있는 압축파의 뒷부분의 합을 기록하게 된다. 그림 1(d)에서는 시간 t_4 일때 파가 상부 로드셀을 지나 해머에 도달하게 되는 것을 보여준다. 이때 로드는 해머로부터 떨어지게되고 에너지의 전달도 멈추게 된다. 이후 인장파는 로드와 자유단에서 반사되어 이차의 압축파로서 로드를 따라 다시 내려오게 된다. 그림 1(e)에 보인바와 같이 시간 t_5 일때 이차 압축파는 상부 로드셀을 지나게되고 이차의 샘플러 관입을 위한 에너지를 전달한다. 에너지가 전부 소산되어 관입이 불가할 때까지 이러한 거동이 계속된다.

SPT 파형 계측을 통해 지반의 동적 특성을 발견할 수 있는 것은 앞에서 언급한 그림 1(c)의 시점에서 샘플러 관입에 대한 지반의 반작용(반력, 변위 등)이 반사파의 형태로서 속도 및 하중 파형에 영향을 미치게 되고, 이에 대한 분석을 통해 지반의 동적 거동을 파악할 수 있기 때문이다. 지반의 동적 물성치 산정법으로 활용하는데 있어서 SPT의 장점중 하나는, 선단뿐 아니라 주변부에서도 지반의 연속적인 반작용이 발생하는 말뚝과는 달리 SPT는 샘플러 선단부에서만 집중적으로 지반 반작용이 일어나기 때문에, 간단한 해석해의 형태로 해를 구할 수 있다는 것이다.

2.2 동적 지반 모델

Smith(1960)가 말뚝의 동적 분석 방법을 제안한 이래, 말뚝의 파동방정식 해법은 항타공식을 사용한 말뚝지지력 산정법의 불확실성을 상당히 제거하였기 때문에, 말뚝의 지지력 평가, 타입시의 말뚝응력 분석 등에 널리 사용되고 있는 실정이다. 파동방정식 해석에서 지반의 동적 거동을 나타내기 위해서 사용되는 지반 모델로서는 Smith 모델이 대표적이며, 이 모델에 기반을 둔 CASE 모델,

TTI 모델 등이 사용되고 있다.

1960년 제안되어 말뚝의 파동방정식 해석에 널리 사용되고 있는 Smith 지반모델은, 탄소성의 정적 지반 거동 및 선형 점성 형태의 속도 의존적인 동적 지반 거동을 가정하고 있으며, 정적 지반 저항력, 퀘이크(quake), 감쇠 계수(damping factor)의 세가지 모델 정수로 묘사된다. 이 모델에 따르면 말뚝 세그먼트(또는 SPT 샘플러)에 작용하는 전체 동적 지반 저항력 R_t 는 다음과 같이 계산된다.

$$R_t = R_s(1 + J\dot{u}) \quad (1)$$

여기서 R_s 는 변위 u 에 기반을 두고 계산된 정적 지반 저항력, \dot{u} 는 R_d 가 작용하는 말뚝 세그먼트의 속도, J 는 Smith 감쇠 계수이다.

$$R_s = \frac{R_u}{q} u \quad \text{for } u \leq q \quad (2a)$$

$$R_s = R_u \quad \text{for } u > q \quad (2b)$$

q 는 퀘이크로 불리며 선형탄성 거동을 하게되는 한계 변위이고, R_u 는 각 말뚝 세그먼트의 정적 극한 저항력이다.

Case Western University에서 제안한 CASE 지반 모델은 원래의 Smith 지반 모델을 변형시킨 모델로서, 다음과 같이 동적 지반 저항력을 정적 지반 저항력과 분리하여 말뚝 속도에만 의존하도록 한다.

$$R_t = R_s + JZ\dot{u} \quad (3)$$

여기서, Z = 말뚝의 임피던스.

위에서 언급한 Smith 지반 모델과 CASE 지반 모델의 단점 중 하나는 필요한 지반정수들을 일반적인 토질 시험을 통하여 구할 수 없다는 것이다. 다양한 지반 종류에 따른 Smith 모델 지반정수의 범위를 결정하려는 연구들이 있었으나 같은 분류에 들어가는 토질일 때조차도 매우 넓은 범위의 정수 값들이 가능하다는 것이 발견되었다(Soares 등, 1984). 따라서, 파동방정식 해석시 지반정수를 도표로 결정하는 것은 매우 부정확한 일이 된다.

Smith 모델 지반정수를 결정하기 위한 보다 체계적인 절차로서 CAPWAP 방법이 알려져있다(Rausche 등, 1972). 해머의 각 타격당 말뚝 움직임의 시간 이력과 말뚝 하중을 적절한 데이터 획득 장치로 얻은 후, 지반정

수를 결정하기 위하여 CAPWAP 프로그램을 사용한 신호 일치(signal matching) 절차가 수행된다. 이 방법은 말뚝 두부에서 측정된 파와 가정된 지반정수 및 경계조건에 의해 계산된 파가 최대한 근사해질 때까지 CAPWAP 해석시의 지반정수 및 경계조건들을 반복적으로 수정함으로써 수행된다. 입력치로는 하중, 속도, 하향파 거동이 사용되며 이 경우 계산되는 출력치는 각기 속도, 하중, 상향파 거동이 된다. 그러나, 이 방법은 해의 유일성(unicqueness)에 관한 문제를 지니고 있으며, 실제 말뚝의 동재하 시험을 필요로 하므로 시간적으로 설계 단계에서 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

앞에서 언급한 이유로 인하여 말뚝의 파동방정식 해석을 위한 지반정수들을 지반조사 과정에서 얻을 수 있는 방법으로서 SPT 수행중의 파동 계측 및 분석 절차가 타당성을 갖게 된다. 본 논문에서는 위에서 언급한 두가지 동적지반모델의 지반정수들을 SPT 시험시의 파동 계측을 통해서 산정하는 기법을 고찰 및 제안하고 측정된 파형과 산정된 지반정수들로부터 역산된 이론적 파형을 비교 분석함으로써 각 동적 지반 모델의 적절성을 판단하고자 한다.

3. 파동방정식 지반정수 획득절차

3.1 순차탐색 절차

Goble 등(1992)은 SPT를 통해 파동방정식 지반 정수를 결정하기 위한 보다 체계적인 접근법을 제시하였다. 이 방법은 로드 상부에서 측정한 하중과 속도의 향으로 나타낸 샘플러 선단에서의 반력과 Smith 모델에 의해 계산된 반력의 차가 최소가 되도록 하는 지반 정수를 순차탐색(sequential searching) 절차를 통하여 구하는 것이다. 본 방법은 다른 연구자들이 파동방정식 지반정수를 반복적인 파동방정식 해석 작업을 통하여 직관적으로 결정하는 것에 비하여 보다 설득력이 있는 체계적인 방법으로 판단된다.

샘플러 주면에서의 저항을 무시하면 샘플러 관입에 따른 선단저항력은 다음과 같이 시간에 대한 함수로 쓰여진다.

$$R(t+L/c) = \frac{1}{2}[F_m(t) + F_m(t+2L/c)] + \frac{1}{2}Z[\dot{u}_m(t) - \dot{u}_m(t+2L/c)] \quad (4)$$

여기서, $F_m(t)$, $\dot{u}_m(t)$: 시간 t 일때 로드 상부에서 측정한 하중 및 속도,

$$Z : \text{로드의 임피던스} = \frac{EA}{c},$$

L : 로드 길이,

c : 파의 속도,

E : 탄성계수,

A : 로드 단면적.

샘플러 선단에서의 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 미분하거나 적분함으로써 가속도와 변위를 구할 수 있다.

$$\dot{u}_m(t+L/c) = [\frac{1}{2}F_m(t) + \dot{u}_m(t)] - \frac{1}{2}R(t+L/c) \quad (5)$$

각 지반 모델에 의한 선단 저항력은 다음과 같이 세가지 성분의 합으로 구성된다.

$$R_{ct}(t) = R_a(t) + R_d(t) + R_s(t) \quad (6)$$

여기서 $R_a(t)$ 는 가속도에 관계되는 관성력, $R_d(t)$ 는 속도에 관계되는 저항력 성분, $R_s(t)$ 는 변위에 관계되는 정적 저항력 성분이다.

$R_a(t)$ 와 $R_s(t)$ 는 Smith 모델, CASE 모델에 대하여 다음과 같이 동일하게 표현된다.

$$\begin{aligned} R_a(t) &= m \ddot{u}(t) \\ R_s(t) &= \frac{R_u}{q} u(t) \quad \text{for } u(t) < q \\ R_s(t) &= R_u \quad \text{for } u(t) \geq q \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

m : 샘플러와 함께 거동하는 흙에 의한 중량 성분,

R_u : 정적 극한저항력,

q : 웨이크,

$\ddot{u}(t)$, $u(t)$: 가속도 및 변위.

Smith 모델의 경우 속도에 관계되는 저항력 성분 $R_d(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_d(t) = J \dot{u}(t) R_s(t) \quad (8)$$

여기서, J : Smith 감쇠계수,

$\dot{u}(t)$: 속도.

CASE 모델의 경우 속도에 관계되는 저항력 성분 $R_d(t)$

는 정적 저항력 성분 $R_s(t)$ 와 무관하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_d(t) = J_c Z \dot{u}(t) \quad (9)$$

여기서, J_c : CASE 감쇠계수.

측정된 하중 파형과 각 모델에 의해 계산된 하중 파형 사이의 차이는 다음과 같이 평균제곱오차로서 표현된다.

$$E[(R - R_{cT})^2] = \frac{\int_{t_0}^{t_f} (R - R_{cT})^2 dt}{t_f - t_0} \quad (10)$$

여기서, $E[]$: 평균,

t_0 : 측정된 시간 영역에서의 초기값,

t_f : 측정된 시간 영역에서의 최종값.

순차탐색 절차는 가능한 지반정수의 조합을 식 10에 대입하여 평균제곱오차를 평가하고 이 값이 최소가 될 때의 지반정수 조합 J, R_u, q 를 구하는 방법이다. 순차탐색 절차의 단점으로는, 무수히 많은 지반정수의 조합이 가능하고 각 조합에 대하여 제곱오차 평가를 위해 시간에 대한 적분을 매번 실시해야하기 때문에, 계산 시간이 너무 길어진다는 것이다.

3.2 포인트 매칭 절차

본 절차는 지반 모델에 따라 계산되는 하중 R_{cT} 와 실험된 하중 R 이 특정 시간에서 일치하도록 관계식을 유도하여 지반 정수를 산정하는 방법이다(Abou-matar 등, 1996). 본 절차에 의한 파동방정식 정수 산정법을 순서대로 설명하면 다음과 같다.

- 1) 웨이크 q : 속도 성분의 적분을 통해 구한 변위 성분의 최대값에서 최종 변위를 빼줌으로써 산정된다.
- 2) 정적 극한저항력 R_u : 그림 2의 A점으로 부터 구해진다. 이 지점에서 속도 및 가속도는 0에 가까워지므로 반력성분중 R_a, R_d 는 0이 된다. 식 6으로부터 $R_{cT} = R_s$ 가 되므로 R_u 를 결정할 수 있다.
- 3) 감쇠계수 J 또는 J_c : 가속도가 해머 타격후 처음으로 0이 되는 지점 B에서 구한다. 이때 $R_a = 0$ 이 되며 R_s 는 앞에서 구한 R_u, q 를 이용하여 산정되므로 식 6과 식 8 또는 식 9에 대입하여 감쇠계수 J 또는

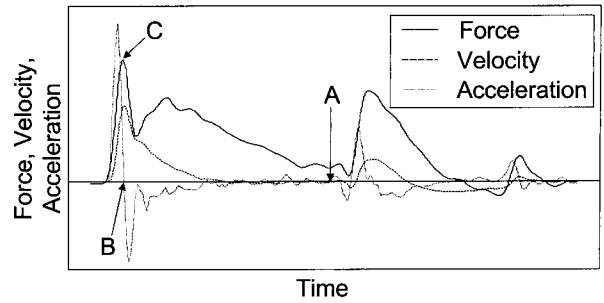


그림 2. 샘플러에서의 시간에 대한 하중, 가속도, 속도 관계

J_c 를 구할 수 있다.

- 4) 중량 m : 하중이 최대가 되는 C점에서 구해지며 이때 R_{cT} 에 대한 가속도 효과가 최대가 된다. 앞에서 구한 정수들을 이용하여 R_d, R_s 를 결정할 수 있으므로 식 6과 식 7에 대입하여 m 을 구한다.

본 절차의 특성상 산정된 지반 정수로 계산되는 시간-하중 파형과 측정된 시간-하중 파형은 특정 시간에서만 일치하게 되며 시간 영역 전체에 대한 오차의 크기와는 관련이 없는 단점을 가지고 있다.

3.3 개선 절차

앞에서 언급하였듯이 포인트매칭 절차의 경우, 선택된 특정 시간에서만 이론치와 측정치의 오차를 최소화 만들기 때문에 전시간 영역에서의 오차에 대한 고려가 없다는 단점을 가지고 있으며, 순차탐색 절차의 경우 수많은 지반정수 쌍의 조합이 가능하기 때문에 계산 시간이 너무 길어지는 단점이 있다. 이에따라 본 논문에서는 두 방법의 단점을 보완할 수 있는 개선된 절차를 제안하고자 한다.

SPT를 통해 파동방정식 지반 정수를 결정하는 문제는 이론치와 측정치의 오차가 전 시간 영역에 걸쳐 최소화 되도록 하는 오차 최소화 문제로 접근하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 그러나 Smith 모델과 CASE 모델 모두 정적 저항력이 변위에 대해 비선형의 특성을 가지고 있으므로, 각 변수로 편미분하는 과정을 통하여 일반적인 해석해를 얻기에 난해한 면이 있다. 개선 절차에서는 비선형 특성을 가진 지반정수 중 웨이크 q 만을 포인트매칭 절차로 결정하고 나머지 지반정수들에 대해서는 편미분 방정식을 이용한 포텐셜 문제로서 다루게 된다.

웨이크 q 는 포인트매칭 절차와 동일하게 산정한다.

최소오차를 만족시키는 나머지 지반 정수를 구하기 위해서는, 제곱오차에 대한 각 지반 정수의 편미분량이 0을 만족해야 한다는 조건을 적용한다.

$$\frac{\partial}{\partial m} E[(R - R_{ct})^2] = 0 \quad (11a)$$

$$\frac{\partial}{\partial J} E[(R - R_{ct})^2] = 0 \quad (11b)$$

$$\frac{\partial}{\partial R_u} E[(R - R_{ct})^2] = 0 \quad (11c)$$

Smith 모델에 최소 오차 조건을 적용하면 식 (12)의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E[\ddot{u}^2] & E[\overline{R}_s \ddot{u}\dot{u}] & E[\overline{R}_s \ddot{u}] \\ E[\overline{R}_s \ddot{u}\dot{u}] & E[\overline{R}_s^2 \dot{u}^2] & E[\overline{R}_s^2 \dot{u}] \\ E[\overline{R}_s \ddot{u}] & E[\overline{R}_s^2 \dot{u}] & E[\overline{R}_s^2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m \\ J R_u \\ R_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E[R\ddot{u}] \\ E[RR_s \dot{u}] \\ E[RR_s] \end{Bmatrix} \quad (12)$$

여기서 \overline{R}_s : 극한 저항력 R_u 를 1로 가정했을 때의 정적 지반 저항력 R_s .

마찬가지로 CASE 모델의 경우 다음과 같은 식 (13)과 같은 행렬식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} E[\ddot{u}^2] & E[\dot{u}\dot{u}] & E[\overline{R}_s \ddot{u}] \\ E[\dot{u}\dot{u}] & E[\dot{u}^2] & E[\overline{R}_s \dot{u}] \\ E[\overline{R}_s \ddot{u}] & E[\overline{R}_s \dot{u}] & E[\overline{R}_s^2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m \\ J_c \\ R_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E[R\ddot{u}] \\ E[R\dot{u}] \\ E[R\overline{R}_s] \end{Bmatrix} \quad (13)$$

식 (12), (13)으로부터 파동방정식 지반정수를 산정할 수 있으며, 이 방법은 순차탐색 절차와 같이 평균제곱오차를 반복하여 재평가할 필요가 없고 해의 유일성을 보장한다는 장점이 있다. 이러한 절차로 산정한 지반정수를 사용하여 이론적인 시간-하중 관계를 역산할 수 있다. 이때 측정된 하중 파형과 계산된 하중 파형에는 어느 정도의 오차가 발생한다. 오차의 요인은 계측 오차, 동적 지반 모델과 실제 동적 거동의 차이, 로드 연결부의 헐거움, 로드와 샘플러 단면변화로 인한 반사파의 영향 등을 들 수 있으며 이러한 오차의 크기로서 동적 지반모델, 지반정수 산정 절차의 적절성을 비교할 수 있다.

4. 예제 해석

본 논문에서 제안한 지반정수 획득절차를 검증하고자 2개의 예제를 통해 앞에서 언급한 절차를 적용하였다. 예제 1은 Abou-matar 등(1996)의 문헌에 제시된 파

형을 이용하였으며 예제 2는 서해안 고속도로 건설공사가 진행중인 전라북도 김제지역에서 현장시험을 실시하여 얻은 파형을 사용하였다. 두 예제에서는 Smith 모델과 CASE 모델에 대한 지반정수를 앞에서 제시한 세 가지 절차를 이용하여 구한 결과를 비교하였다.

4.1 예제 1: Abou-matar 등

첫번째 예제에서 검증한 측정점에서의 속도 및 하중 파형은 그림 3과 같다.

그림 3과 같은 파형에 파동 전파 이론에 따라 식 4와 식 5를 적용하면 샘플러에서의 하중 파형과 속도 파형을 얻을 수 있다. 여기서 얻은 샘플러에서의 파형을 사용하여 각 절차에 따라 지반정수를 구하면, 지반 정수와 RMS 오차를 구할 수 있다. 여기서 RMS 오차는 실측치에서 산정한 샘플러 파형, 그리고 획득한 지반정수를 식 6에 대입해서 역산한 파형 사이의 오차다.

표 1과 표 2는 각각 Smith 모델과 CASE 모델의 지반정수를 세가지 절차에 의하여 산정한 결과와 RMS 오차를 보여준다. RMS 오차로 판단할 때 개선절차 및 순차탐색법은 포인트매칭 절차에 비하여 더 뛰어난 결과를 보여주고 있다. 포인트매칭 절차로 구한 지반정수 값들은 나머지 두 절차에 의한 값들과 큰 차이를 보였으며 이러한 결과는 포인트매칭 절차로 구한 지반정수 값들은 전체 시간 영역의 몇몇 점들에 의하여 평가되기 때문인 것으로 판단된다. 개선절차 및 순차탐색법으로 구한 지반정수 값들은 0.1~6.7%, RMS 오차의 경우는 1.6~2.3%의 차이를 보였으며 순차탐색법에 요구되는 방대한 계산시간을 고려할 때 이러한 차이는 실용적으로 무시할 수 있을 정도의 차이로 판단된다. 순차탐색법의 경

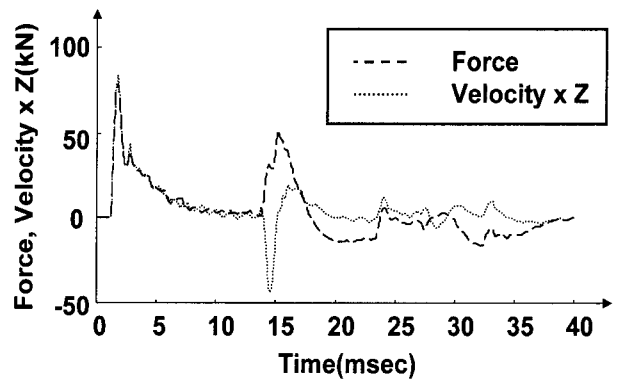


그림 3. 수치 예제 파형

표 1. Smith 모델에 대한 지반정수(예제 1)

	포인트매칭	혼합법	순차탐색법
m (kg)	0.0005	0.050	0.049
J (sec/m)	0.019	0.030	0.032
R_u (kN)	13.88	9.43	9.41
q (mm)	7.22	7.22	7.21
RMS오차(kN)	7.14	6.40	6.25

우 식 (10)에 의한 평균제곱오차 판정을 위하여 각 지반정수의 영역을 1000 등분하여 사용한다면 네가지 지반정수의 조합으로는 1000의 4제곱인 10^{12} 번의 일련된 계산을 수행하여야 한다. 또한 계산회수를 줄이기 위해 가정된 지반정수의 증분을 늘리게 되면 이는 지반정수 산정시의 정확도에 영향을 미치게 된다. 개선절차 및 순차탐색법에 의한 결과가 차이를 보이는 이유는 개선절차에 적용된 q 값의 차이 때문이며 동일한 q 값을 사용할 경우 거의 동일한 결과를 보일 것으로 판단된다. 순차탐색법의 경우 계산시간이 오래 걸린다는 점 이외에 각 지반정수의 존재 범위 및 지반정수 증분을 다르게 설정할 때 상이한 결과를 얻게 된다는 단점을 가지고 있다.

Smith 모델과 CASE 모델 적용시 세 절차에 의한 역산파형과 실측파형을 그림 4와 그림 5에 비교하였다. 포인트 매칭 절차의 경우 반사파가 들어온 시점부터 오차가 커지기 시작하여 파형의 후반부에서는 상당히 큰 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 개선 절차나 순차탐색 절차에서 얻은 파형에서는 그 오차 정도가 상당히 줄었음을 알 수 있다. 이는 R_u 를 감소시켜 파형의 후반부에 큰 값을 갖지 않는 정적 저항력을 줄이는 대신, J 를 증가시켜 동적 저항력의 영향을 더 크게 산

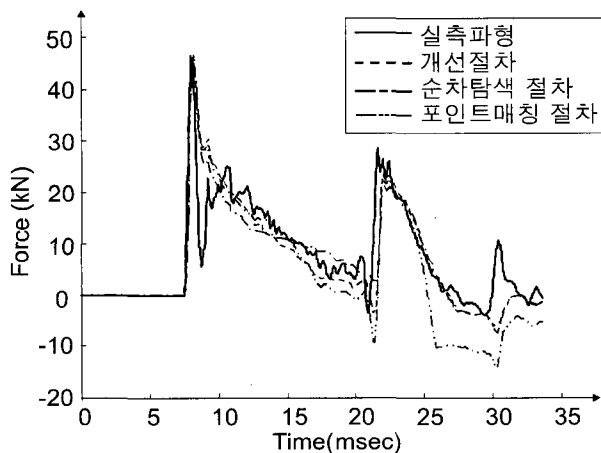


그림 4. 실측파형과 각 절차에 의한 역산파형(Smith 모델)

표 2. CASE 모델에 대한 지반정수(예제 1)

	포인트매칭	혼합법	순차탐색법
m (kg)	0.0008	0.047	0.049
J (kN · sec/m)	2.29	0.67	0.66
R_u (kN)	13.88	9.13	9.00
q (mm)	7.22	7.22	7.21
RMS오차(kN)	7.07	6.24	6.14

정함으로써 반사파 이후 구간에서의 오차를 감소시키는데 그 원인이 있다.

4.2 예제 2: 전라북도 김제 현장시험

본 예제에서는 서해안 고속도로 건설공사가 진행중인 전라북도 김제지역에서 수집한 데이터를 분석하였다. 대상 지반은 사질토 지반이었으며 심도 9.5m, 12.5m, 14m에서 수집한 파형으로부터 Smith 모델과 CASE 모델에 대한 지반정수를 앞에서 언급한 세가지 절차를 이용하여 산정하였다. 이때 각 심도에서의 N치는 각기 23, 46, 50으로 나타났다.

표 3과 표 4는 각각 Smith 모델과 CASE 모델의 지반정수를 세가지 절차에 의하여 산정한 결과와 RMS 오차를 심도별로 나타내고 있다. RMS 오차를 보면 예제 1에서와 마찬가지로 개선절차 및 순차탐색법이 포인트매칭 절차에 비하여 더 뛰어난 결과를 보여주고 있다. 개선절차에 대한 순차탐색법으로 구한 지반정수 값들의 차이는 0~20%였으며 RMS 오차의 경우는 0.9~2.5%의 차이를 보였다. 동일한 방법으로 구한 q 값을 제외할 경우 개선절차에 대한 포인트매칭 절차로 구한 지반정

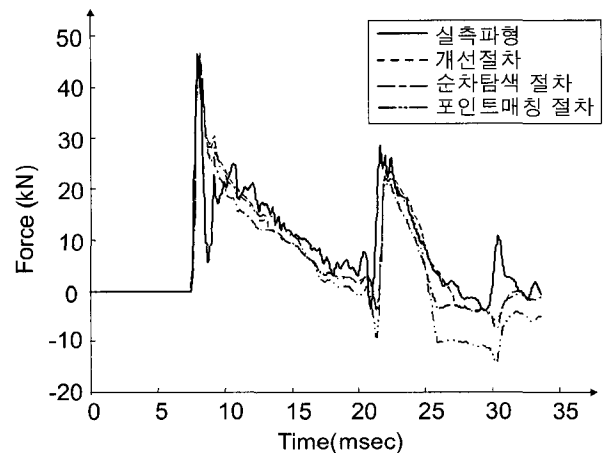
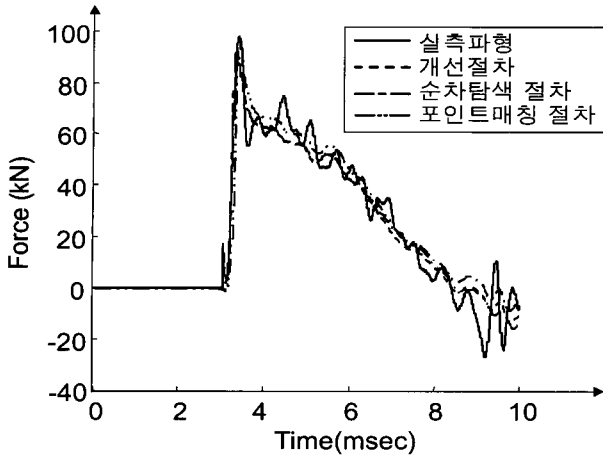
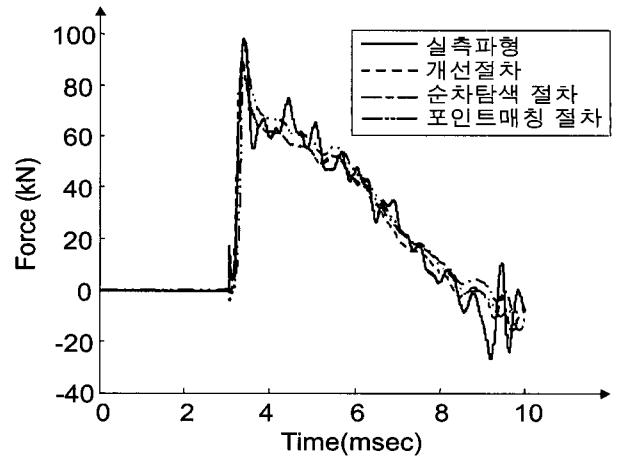


그림 5. 실측파형과 각 절차에 의한 역산파형(CASE 모델)



(a) Smith 모델



(b) CASE 모델

그림 6. 심도 14m에서의 파형분석

표 3. Smith 모델에 대한 지반정수(예제 2)

	지반정수	심도(m)		
		9.5	12.5	14
개선절차	m (kg)	1.10	0.20	0.10
	J (sec/m)	0.49	0.34	0.21
	R_u (kN)	18.6	34.8	48.0
	q (mm)	0.28	0.38	0.41
	RMS오차(kN)	14.7	12.2	10.0
	순차탐색절차	m (kg)	1.15	0.16
J (sec/m)		0.41	0.41	0.20
R_u (kN)		19.8	33.3	48.4
q (mm)		0.25	0.40	0.45
RMS오차(kN)		15.0	11.9	9.91
포인트매칭절차		m (kg)	0.0095	0.0045
	J (sec/m)	0.11	0.15	0.16
	R_u (kN)	34.4	35.6	51.1
	q (mm)	0.28	0.38	0.41
	RMS오차(kN)	18.5	14.1	12.2

표 4. CASE 모델에 대한 지반정수(예제 2)

	지반정수	심도(m)		
		9.5	12.5	14
개선절차	m (kg)	1.33	0.012	0.078
	J (kN · sec/m)	12.3	11.4	8.98
	R_u (kN)	15.1	34.8	48.5
	q (mm)	0.28	0.38	0.41
	RMS오차(kN)	12.9	11.9	10.0
	순차탐색절차	m (kg)	1.34	0.013
J (kN · sec/m)		11.8	13.4	8.84
R_u (kN)		15.6	33.2	48.9
q (mm)		0.25	0.40	0.45
RMS오차(kN)		13.9	11.6	9.91
포인트매칭절차		m (kg)	0.0098	0.0033
	J (kN · sec/m)	6.39	5.35	6.78
	R_u (kN)	34.5	35.6	51.1
	q (mm)	0.28	0.38	0.41
	RMS오차(kN)	18.9	14.0	12.0

수 값들의 차이는 2.3~128%였으며 RMS 오차의 경우는 16~46.5 %의 차이를 보였다. 심도 14m에서 얻어진 실측파형과 세 절차에 의한 역산파형을 그림 6에 제시하였다. 그림 6에서 Smith 모델과 CASE 모델에 대한 역산파형 사이의 차이가 크지 않다는 점과 두 모델에 대한 RMS 오차의 차이가 12.2 % 이내로 작다는 점으로부터 표준관입시험의 동적 모델링시 두 모델의 차이는 그다지 크지 않은 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 보다 개선된 파동방정식 지반정수 획득 절차를 제안하였다. 제안 방법은 산정된 지반정수에 의한 파형과 실측된 파형 사이의 RMS 오차를 최소화할 수 있는 지반정수를 간단한 행렬식의 형태로 구할 수 있으며, 해의 유일성을 확보할 수 있다. 기존 포인트 매칭 절차에서는 시간 영역의 몇몇 점에만 의존하여 지반정수를 획득하였기 때문에 오차를 분포시킬 수 없었으나, 제안한 절차에서는 최소오차에 대한 고려를 통해 전체 시간 영역에서의 오차를 최소화할 수 있었다. 또한

간단한 행렬식으로 해를 구함으로써, 무수히 많은 지반 정수의 조합에 대해 평균제곱오차를 반복적으로 재평가해야 하는 순차탐색 절차의 단점을 개선하였다.

참 고 문 헌

1. 이명환(1991), "표준관입시험 결과의 표준화", *대한토질공학회지*, 03 Vol.7, No.1, pp.69-85.
2. 이우진, 이원제, 안신환(1998), "PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정", *한국지반공학회 '98년도 봄 학술발표회 논문집*, pp.75-84.
3. 이호춘, 박용원(1996), "표준관입시험의 해머에너지 수준", *한국지반공학회지*, 10 Vol.12, No.5, pp.117-126.
4. Abou-matar, H., Rausche, F., Thendean, G., Likins, G., and Goble, G.G.(1996), "Wave Equation Soil Constants from Dynamic Measurements on SPT", *Proceedings of Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Florida, pp. 163-175.
5. Goble, G.G. and Abou-matar, H.(1992), "Determination of Wave Equation Soil Constants from the Standard Penetration Test", *Proceedings of Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Hague, The Netherlands, pp.99-103.
6. Kovacs, W.D. and Salomone, L.A.(1982), "SPT Hammer Energy Measurement", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.108, No.4, pp.599-620.
7. Liang, R.Y. and Sheng, Y.(1993), "Wave Equation Parameters from Driven-rod Test", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No.6, pp.1037-1057.
8. Liang, R.Y.(1991), "In Situ Determination of Smith Soil Model Parameters for Wave Equation Analysis", *Geotechnical Engineering Congress*, pp.64-75.
9. Rausche, F., Moses, F., and Goble, G.G.(1972), "Soil Resistance Predictions from Pile Dynamics", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.98, SM9, pp.917-937.
10. Schmertmann, J.H. and Palacios, A.(1979), "Energy Dynamics of SPT", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.105, No.8, pp.909-926.
11. Schmertmann, J.H.(1978), "Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties?-Yes, But..!", *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, ASTM, pp.341-355.
12. Smith, E.A.L.(1960), "Pile-driving Analysis by the Wave Equation", *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 86(4), pp.35-61.
13. Soares, M., de Mello, J., and de Matos, S.(1984), "Pile Driveability Studies, Pile Driving Measurements", *Proceedings of the Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Stockholm, pp.64-71.
14. Sy, A. and Campanella, R.G.(1991), "Wave Equation Modelling of the SPT", *Geotechnical Engineering Congress*, pp.225-240.
15. Yokel, F.Y.(1989), "Energy Transfer Mechanism in SPT", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.115, No.9, pp.1331-1336.

(접수일자 2001. 11. 18, 심사완료일 2002. 7. 28)