

표준관입시험의 동적신호를 이용한 지반 물성치 추정의 해석적 연구

Analytical Studies for Application of SPT Dynamic Signals to Estimate the Elastic Property of the Soil Deposit

이 병 식*¹ Lee, Byung-Sik

김 영 수*² Kim, Young-Soo

Abstract

A test method has been attempted to estimate the soil stiffness by measuring and analyzing dynamic signals of stress waves reflected at the bottom end of the SPT rod contacting a soil deposit. Before conducting a real size testing, a series of parametric studies were conducted in this paper to examine the applicability and the theoretical adequacy of the test method. As a result of these studies, it has been shown that the most significant influence factor affecting the amplitude ratio of the reflected wave to the incident wave at the rod-soil interface was the variation of soil stiffness. Also, the variation of the amplitude ratio was found to be closely related with the variation of impedance ratio of the soil deposit to the SPT rod. As a result, a potential of the test method could be proved to estimate the impedance and the elastic modulus of the soil deposit interfaced with the SPT rod using the test method.

요 지

표준관입시험 시 향타로 인해 시추봉 두부에서 발생하는 응력파가 시추봉 선단과 접해 있는 지반에서 반사되어 돌아오는 동적신호를 분석함으로써, 시추봉 선단부에 인접한 지반의 임피던스(강성)에 관해 보다 상세한 정보를 얻고자 하는 시험방법이 시도되고 있다. 이 시험법의 실규모 시험에 선행하여 본 논문에서는 시추봉-지반시스템에 대한 동적유한요소해석을 통해 동적신호를 얻고, 이들 신호를 분석하여 추정된 지반의 임피던스와 탄성계수의 신뢰도를 평가함으로써 시험법의 적용성을 검토하고자 하였다. 또한 반사파의 특성에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대한 평가를 통해서 실규모 시험을 위한 참고자료를 제공하고자 하였다. 이러한 연구 결과, 시추봉과 지반의 접촉면에서 입사, 반사되는 파동의 진폭비(F_{ref}/F_{inj})에 가장 심각하게 영향을 미치는 인자는 시추봉 선단과 접촉한 지반강성의 변화임을 알았으며, 이들 파동의 진폭비의 변화는 시추봉과 지반 간의 임피던스 비(α)의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 SPT 동적신호를 분석하여 시추봉 선단과 직접 닿아 있는 지반에 대한 임피던스와 변형계수를 추정하는 시험법의 적용 가능성이 있다는 결론을 얻었다.

Keywords : Dynamic finite element analysis, Elastic modulus, Ground stiffness, Impedance ratio, SPT dynamic signals

*1 정희원, 공주대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kongju National Univ., blee@kongju.ac.kr)

*2 정희원, 공주대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kongju National Univ.)

1. 서론

표준관입시험은 장비조작과 시험방법이 비교적 간편하고 현장시험과 동시에 시료를 채취할 수 있는 등 장점이 많아 효율적인 지반조사 방법으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 표준관입시험 시 시추봉 두부에 인접하여 동적신호감지기를 설치하고, 햄머의 타격으로 시추봉을 통해 전달되는 입사파와 시추봉 선단과 인접한 지반의 경계면에서 반사되는 반사파를 측정·분석함으로써 기본적으로 얻는 N 값 외에 부가의 지반정보를 얻고자 하는 시도가 활발히 진행중이다. 이러한 시도는 동적신호의 측정 및 해석기술의 발전으로 가능한 것으로서, 그 일례로 외국에서는 측정된 동적신호로부터 지반의 감쇄비, quake 등을 추정하는 연구가 수행된 바 있다(Clayton, 1990; Goble and Abou-matar, 1992). 또한 이러한 목적으로 동적신호를 측정함에 있어서 SPT 에너지 효율 계측장비를 호환하여 사용할 수 있는 가능성이 있다.

국내에서도 이러한 시도를 위한 기초연구로서 단면적과 재질이 서로 다른 봉을 연결시킨 모형시추봉에 대해서 이를 통해 전파되는 응력파의 전파특성에 관한 실험 및 해석적 연구가 수행되었다(SK 건설 연구소, 2001). 이 연구결과 모형시추봉에서 측정된 동적 신호를 이용하여 이질 시추봉 간의 임피던스비(α)를 추정함으로써 시추봉의 임피던스(Z)를 어느 정도 정량적으로 평가할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 표준관입시험에서 동적신호를 획득하는 경우에 시추봉 선단에 인접한 지반강성의 정량적 평가를 위해서 이러한 기법을 활용할 수 있을 것으로 기대된 바 있다. 그러나, 실제 표준관입시험에서의 파동전파 조건은 수행된 모형실험과 상이하고 여러 가지 영향인자들에 대해서 영향을 받게 될 것이므로 이 기법을 실제로 적용하기 위해서는 추가 연구의 수행이 요구되었다.

이와 같은 배경으로 본 논문에서는 이 기법의 실규모 실험에 선행하여 실제 표준관입시험 조건에서 응력파의 전파특성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 다양한 영향인자들을 고려한 시추봉-지반 시스템의 동적거동을 해석하고, 얻어진 동적신호를 이용한 지반정보 획득의 가능성 여부를 검토하였다.

2. 시추봉-지반 시스템의 동적 거동 해석

2.1 해석 대상 시추봉-지반시스템

표준관입시험에서 햄머의 타격에 의해 발생하는 응력파의 전달 구조를 간략히 나타내면 그림 1에 보인 바와 같다. 그림에서 시추공 내의 시추봉은 공기 중에 노출되어 있어 관입에 대한 저항을 받지 않고, 시추봉의 관입에 저항하는 힘은 시료채취기에서 발생하는 주면 저항과 선단저항이다. 따라서 햄머 타격에 의해 발생한 파동의 전파는 시추봉 선단부 조건에 의해 지배적인 영향을 받을 것으로 추정된다.

그러나 그림 1에서 보인 바와 같은 응력파의 전달구조를 해석에서 모두 상세히 고려하기에는 한계가 있다. 본 논문에서는 동적 해석의 편의와 경제성을 고려하여 그림 1의 전달구조를 간략화한 단순한 조건의 시추봉-지반시스템으로 고려하기로 하였다. 이 시추봉-지반시스템에서 시추봉은 연결부가 없는 균질한 재질의 강철봉으로 가정하였으며, 시료채취기의 구조적 형상은 무시하고 시추봉이 직접 지반에 관입되거나 지반과 맞닿아 있는 경우들을 고려하였다.

본 논문에서는 단순한 조건의 시추봉-지반 시스템에 대해 시추봉을 통한 응력파의 전파특성을 조사함에 있어서 이에 상당한 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되는 대표적인 영향인자들을 선정하였다. 선정된 영향인자들은 ① 시추봉-지반의 강성비 변화, ② 시추봉의 관입 깊이 변화, ③ 시추공의 깊이 변화, ④ 깊이에 따른 지반

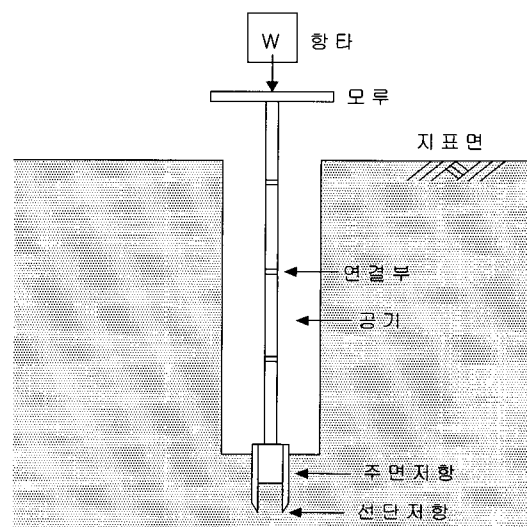
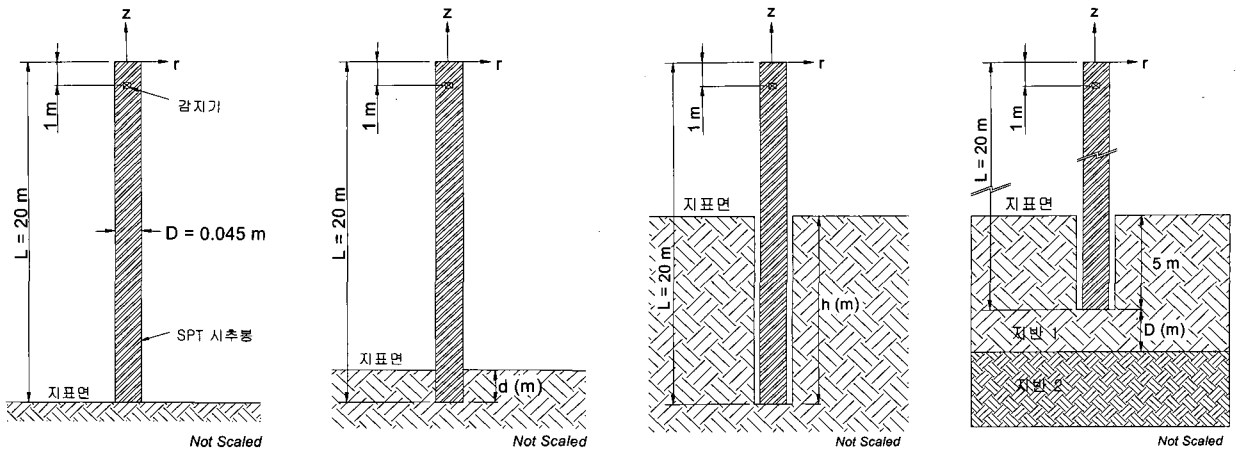


그림 1. SPT 시험에서 동적신호 전달 시스템의 개요



(a) 지반의 강성 (b) 시추봉의 관입깊이 (c) 시추공의 깊이 (d) 깊이방향 지반강성 변화

그림 2. 영향인자에 따른 시추봉-지반시스템의 개략도

층의 강성 변화 등이다. 이들 영향인자 들을 각각 고려하여 정한 해석대상 시추봉-지반시스템의 개략도를 그림 2에 정리하여 나타냈다.

2.2 시추봉-지반시스템의 유한요소해석

시추봉-지반시스템의 동적거동을 해석적으로 구현하기 위해서 영향인자의 변화에 따른 각 시추봉-지반시스템(그림 2)을 그림 3에 보인 바와 같은 축대칭 조건의 유한요소모델로 이상화하였다. 이 모델에서 시추봉과 시추봉에 인접한 영역의 지반(시추봉의 중심으로부터 수평방향으로 10m, 수직방향으로 10m 영역)에 대해서는 축대칭 4절점 평면요소를 적용하였다. 이들 요소망의 외곽에는 축대칭 4절점 평면무한요소를 적용하여 경계면 반사파의 영향을 배제하였다. 적절한 해석결과를 얻을 수 있는 요소망의 간격을 결정하기 위한 일련의 수치해석 결과(김영수, 2002)에 근거하여 수직방향에 대해서는 요소의 간격을 0.2m로 하였으며, 횡방향으로는 시추봉 주변에서 최소폭(0.2m)을 가지고 시추봉에서 멀어질수록 점진적으로 증가되는 폭을 가지는 요소들로 구성하였다.

햄머 낙하에 의해 임의의 시간에 시추봉에 가해지는 충격하중은 다음 식으로 표현되는 반파장의 정현파로 가정하였다.

$$p(t) = P_0 \sin\left(\frac{\pi}{T_d}t\right) \quad (1)$$

여기에서 T_d 는 충격하중의 지속시간으로 0.00009초,

P_0 는 최대진폭으로 622.3 N의 값을 가지는 것으로 가정하였다. 충격하중은 집중하중으로 시추봉의 중심에 재하되는 것으로 가정하였다. 해석 결과 얻는 파형 분석을 용이하게 하기 위해서 지속시간과 진폭에 대해서 실제 SPT시험과는 다소 상이한 값들이 적용되었다.

시추봉은 길이 20m, 지름 45mm의 균질한 강철봉으로 가정하였다. 강철의 특성치는 밀도 $7,200\text{kg/m}^3$, 탄성계수 $180,000\text{Mpa}$, 포와송비 0.3, 압축파 속도 $5,000\text{m/sec}$ 로

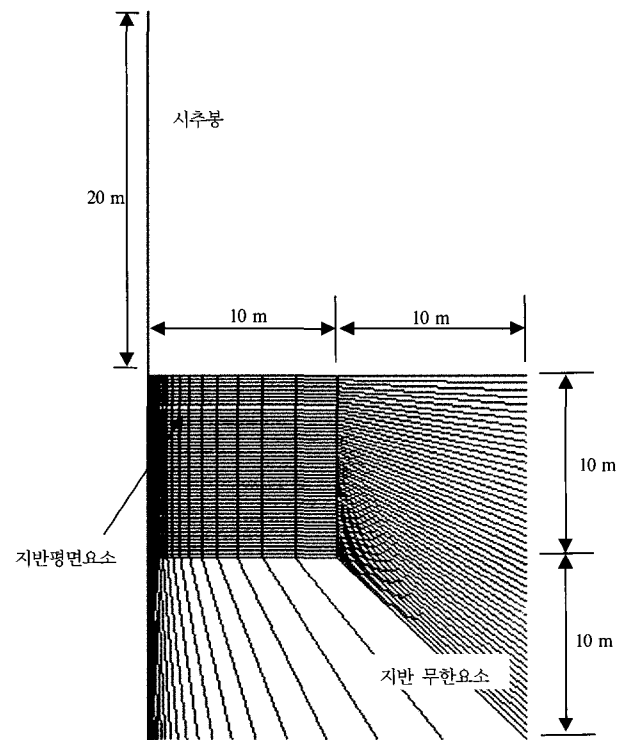


그림 3. 시추봉-지반 시스템의 유한요소 모델링의 일례

표 1. 해석에 적용한 지반의 물성치

구분	ρ (kg/m ³)	ν	E (Mpa)	V_p (m/sec)
A	1800	0.40	50	245
B	1900	0.40	192	465
C	1950	0.40	341	612
D	2100	0.40	720	857
E	2500	0.23	1185	741
F	2600	0.20	8500	1900

가정하였다. 지반의 강성변화에 의한 영향을 고려하기 위해서 적용한 지반의 물성치들은 표 1에 정리한 바와 같다.

시추봉-지반시스템의 유한요소해석을 위하여 범용프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유한요소해석에서 적용한 시간간격은 0.00002초이며, 상세한 주파수 스펙트럼을 얻고자 하는 경우를 제외하고는 지속시간 0.02048초 (1024단계)까지의 동적거동을 해석하였다.

2.3 해석결과 분석의 이론적 배경 : 단면적이 국한된 1차원 탄성재료

단면적이 국한된 1차원 탄성재료에 대해서 재료의 임피던스(Z)는 다음 식으로 정의된다.

$$Z = \frac{AE}{V_p} \quad (2)$$

여기서 A 는 파동이 전파되는 재료의 단면적, E 는 탄성계수, V_p 는 압축파 속도이다.

강성이 서로 다른 두 재료가 그림 4에 보인 바와 같이 접촉되어 있는 경우에 두 재료간의 임피던스 비(α)는

$$\alpha = \frac{A_r E_r / V_{p,r}}{A_l E_l / V_{p,l}} \quad (3)$$

로 표현된다. 여기서 l 과 r 은 각각 왼편, 오른편 매질을 지칭한다.

이 때 한쪽 편 재료를 통해 입사되는 입사파에 대해서 두 재료의 경계면에서 반사되는 반사파의 힘신호에 대한 진폭 변화는 이론적으로 다음 식의 관계로 성립한다.

$$\frac{F_{\text{반}}}{F_{\text{입}}} = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \quad (4)$$

여기서 $F_{\text{입}}$ 와 $F_{\text{반}}$ 는 각각 입사파와 반사파의 힘신호 진폭을 나타낸다. 만약 경계면에서 발생하는 입사파

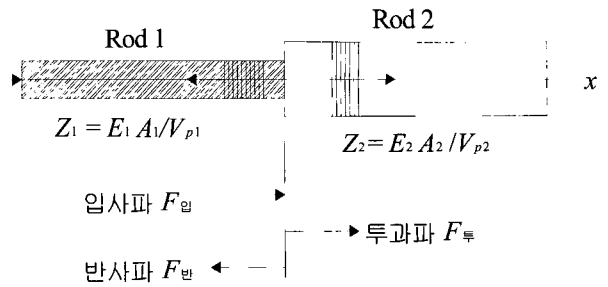


그림 4. 응력파의 입사, 반사 및 투과

와 반사파의 힘신호를 측정하는 경우에 식 (4)로부터 이질 재료간의 임피던스 비를 구할 수 있다. 이 때 좌측 재료의 임피던스를 알고 있다면 식 (3)의 관계로부터 우측 재료의 임피던스를 추정할 수 있다. 또한, 우측재료의 단면적과 밀도 값을 알고 있다면 식 (2)의 임피던스 정의로부터 재료의 탄성변형계수를 추정할 수 있다.

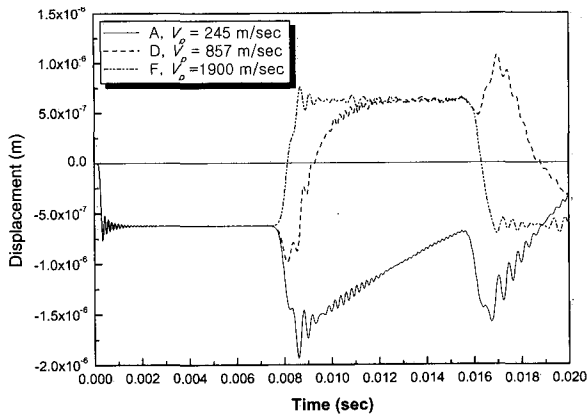
한편 속도신호와 힘신호는 다음 식의 관계에 있으므로 힘신호 대신에 속도신호를 측정하여 사용할 수도 있다.

$$F = \dot{u} \times \frac{EA}{V_p} \quad (5)$$

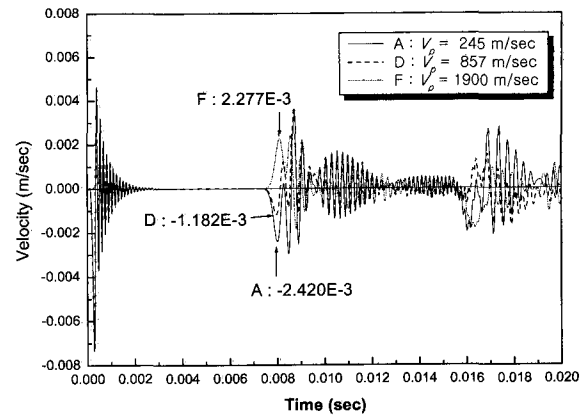
위 식에서 \dot{u} 는 속도신호의 크기이다. 속도신호로부터 임피던스비를 추정하는 경우에는 인장파와 압축파를 구분하는데 주의를 요한다. 힘신호는 좌표계와 상관없이 일반적으로 압축파인 경우에 (+), 인장파인 경우에 (-)의 부호로 측정되지만, 측정된 속도신호의 부호는 좌표계에서 입자의 변위방향에 따라 결정되기 때문에 응력파의 종류를 구분하는데 판단이 요구된다. 응력파의 종류는 재료의 동적 경계조건에 따라서 변화하며 이 조건은 두 재료간의 임피던스 비에 영향을 받는다. 즉, 임피던스 비(α)가 0인 경우에 자유단 조건이 되고, ∞ 인 경우에는 고정단 조건이 된다. 측정된 신호에 대한 주파수영역에서의 공진주파수를 분석하면 경계조건의 변화를 용이하게 추정할 수 있다.

3. 영향인자가 동적신호에 미치는 영향

해석 대상 시추봉-지반 시스템에 대한 동적해석을 수행하고, 이들 결과로부터 2.1에서 정한 영향인자가 파동에 미치는 영향, 특히 지반정보를 추정하기 위해서 사용할 결과인 입사파와 반사파의 진폭 변화에 미치는 영향을 평가하였다.



(a) 수직방향 변위신호



(b) 수직방향 속도신호

그림 5. 지반강성 변화에 따른 측정신호의 변화

3.1 시추봉과 지반간의 강성비 변화

지반 강성변화의 영향을 평가하기 위해서 그림 2 (a)에 보인 바와 같이 시추봉이 지표면에 있는 경우에 대해서 지반조건을 각각 표 1의 지반 A, 지반 D와 지반 F로 가정한 경우들에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 얻은 변위신호와 속도신호를 그림 5(a)와 (b)에 각각 보였다.

시추봉 선단에서 발생한 응력파가 선단으로부터 1m 이격된 지점에 설치된 감지기에 의해 측정되는 시간은 이론적으로 0.0002초(1/5000)이다. 이 응력파가 시추봉 선단에서 반사되어 돌아올 때 같은 위치의 감지기에서 반사파가 측정되는 시간은 0.0078초(39/5000)이다. 이와 같은 입사파와 반사파의 이론적인 도달시간은 그림 5에 나타나는 입사파와 반사파의 도달시간과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

그림 5(b)에 보인 세 가지 지반조건에 대한 속도신호에서 첫 번째 입사파와 반사파의 진폭으로부터 식(5)의 관계를 이용하여 힘신호의 진폭을 구할 수 있다. 구한 힘신호를 이용하여 입사파에 대한 반사파의 진폭비(F_{ref}/F_{in})를 결정하는 과정과 결과를 표 2에 정리하였다. 이 표의 결과를 보면 지반강성의 변화에 따라서 진폭비가

매우 민감하게 변화함을 알 수 있었다.

한편, 그림 5와 표 2의 결과로부터 판단할 때 지반의 강성이 변함에 따라 시추봉의 동적 경계조건이 변하는 것을 알 수 있었다. 자유단-자유단, 자유단-고정단 동적 경계조건에서 시추봉의 이론적인 공진주파수는 표 3에 정리한 바와 같다. 지반조건에 따른 공진주파수의 변화를 알아보기 위해서 그림 5 (a)에 보인 변위신호를 푸리에 변환하여 나타내면 그림 6과 같다. 이 그림의 결과로부터 구한 공진주파수를 표 3에 함께 정리하여 이론적인 공진주파수와 비교하였다. 표 3의 결과에서 지반 A와 지반 F의 경우들을 보면, 단부 경계조건을 가정한 이론적인 공진주파수와 해석을 수행하여 얻은 공진주파수는 거의 일치하여 지반 A에 대해서는 자유단-자유단 조건, 지반 F에 대해서는 자유단-고정단 경계조건에서 시추봉이 진동함을 알 수 있었다. 한편, 강성이 지반 A와 지반 F의 중간정도인 지반 D에 대해서는 경계조건이 명확하지 않았다. 그러나 상대적으로 연약한 지반으로부터 단단한 지반으로 갈수록 단부경계조건은 자유단-자유단 조건에서 자유단-고정단 조건으로 변화함을 예상할 수 있었다.

표 2. 지반강성의 변화에 따른 F_{ref}/F_{in} 값의 변화

지반조건 (V_p , m/sec)	입사파		반사파		F_{ref}/F_{in}
	속도 ($\times 10^{-3}$ m/sec)	힘(N)	속도 ($\times 10^{-3}$ m/sec)	힘(N)	
지반 A (245)	-7.352	420.8	-2.420	-138.5	-0.3291
지반 D (857)	-7.352	420.8	-1.182	-67.66	-0.1608
지반 F (1900)	-7.352	420.8	2.277	130.34	0.3097

표 3. 시추봉의 경계조건에 따른 이론공진주파수와 지반조건에 따른 공진주파수의 변화 비교

단부 조건	계산식	n	이론 공진주파수 (Hz)	해석에서 구한 공진주파수 (Hz)		
				지반 F (V _p = 1900m/sec)	지반 A (V _p = 245m/sec)	지반 D (V _p = 857m/sec)
자유단-고정단	$n \frac{V_p}{4L}$ n = 1,3,5...	1	62.5	61.0		
		2	187.5	183.1		
		3	312.5	305.2		
자유단-자유단	$n \frac{V_p}{2L}$ n = 1,2,3...	1	125		128.2	158.7
		2	250		250.2	265.5
		3	375		372.3	390.6

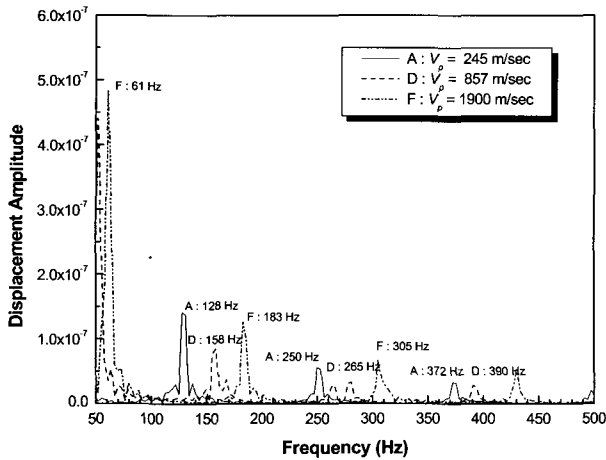


그림 6. 지반강성에 따른 주파수 영역에서의 변위신호 비교

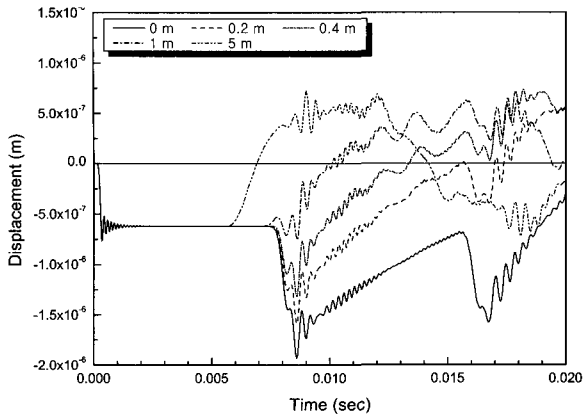
3.2 시추봉의 관입 깊이 변화

표준관입시험에서 시료채취기는 시추공 바닥에서 지반으로 관입된다. 본 논문의 해석에서는 시료채취기를 간략하게 시추봉으로 모델링하였으므로 그림 2(b)에 보인 바와 같이 시추봉이 지반 내로 관입되는 경우에 대해서 관입깊이의 변화에 따른 신호의 변화양상을 알아보기로 하였다. 시추봉의 관입 깊이가 0m, 0.2m, 0.4m, 1m, 5m인 경우들에 대해서 표 1에 보인 지반종류 중 지반 A, 지반 D, 지반 F인 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이 해석에서 시추봉과 주변지반의 상호작용은 고려하지 않았다. 그 이유는 선행연구결과(SK건설연구소, 2001)에 근거하여 시추봉을 통한 파동에는 시추봉과 접해 있는 지반의 강성이 지배적인 영향을 미치고, 시추봉 주변의 구속압이나 시추봉과 지반 사이의 마찰은 그 영향이 심각하지 않을 것으로 예상되었기 때문이다. 이와 같은 해석으로부터 얻은 결과 중 각 관입깊이와 지반종류에 따른 변위신호의 시간이력을 그림 7에 각각 보였다.

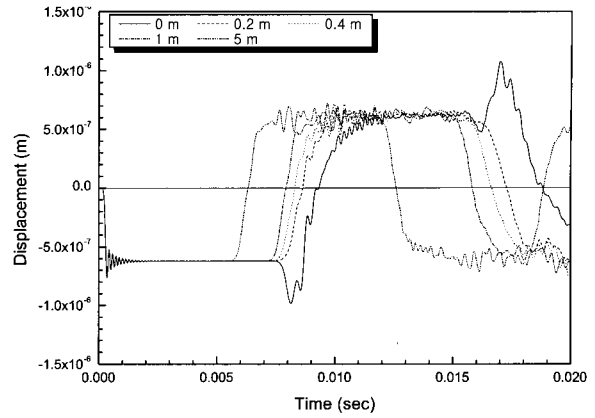
그림 7의 결과로부터 다음의 사항들을 추정할 수 있

었다. 첫째로, 시추봉이 지반에 관입된 경우에 시추봉의 선단에서 반사되는 선단 반사파와 더불어서, 파동이 시추봉의 선단까지 전달되지 않고 지표면과 시추봉의 경계면에서 반사되는 지표면 반사파가 함께 감지되는 것으로 나타났다. 측정된 신호에 대한 지표면 반사파의 영향은 관입깊이가 증가될수록 커지는 것으로 나타났다. 예를 들어, 그림 7(a)의 결과에서 관입깊이 5m인 경우의 신호를 보면 압축파가 지배적으로 측정되고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 강성이 상대적으로 작은 지반 A의 경우에 선단반사파는 인장파이지만, 지표면 반사파는 시추봉 강성의 영향을 크게 받아 압축파로 반사되기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 관입깊이가 감소할수록 작아져서 관입깊이가 약 0.4m 이하인 경우에 반사파는 거의 인장파로 나타남을 볼 수 있었다. 둘째로, 지반 강성이 증가됨에 따라 지표면 반사파가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 예를 들어 그림 8(a)에 보인 지반 A의 경우에 대한 변위신호에서 지표면 반사파의 영향이 큰 관입깊이 5m의 경우에도 선단 반사파의 구분이 가능하였다. 그러나, 그림 7(c)에 보인 지반 F의 경우에서 지표면 반사파는 뚜렷이 나타났지만 관입깊이가 매우 작은 경우에도 선단 반사파는 뚜렷하게 구분할 수 없었다.

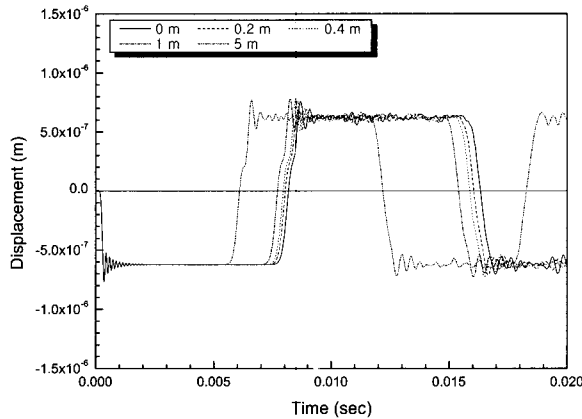
관입깊이의 영향을 보다 상세히 알아보기 위해서 그림 7의 변위신호에 상응하는 지반종류 별 각 관입 깊이에 대한 속도신호를 사용하여 입사파에 대한 반사파의 진폭비를 구하였다. 초기 반사파의 진폭을 결정함에 있어서 선단반사파와 지표면반사파를 구분하지 않고 초기에 반사되는 반사파의 진폭을 측정하였다. 이렇게 구한 진폭비의 변화를 그림 8에 나타냈다. 그림의 결과에서 판단할 때 관입깊이가 1m 이상으로 큰 경우에 지반의 강성을 추정하기 위해 사용할 반사파의 크기가 상당히 변화함을 알 수 있었다. 그림에도 불구하고 지반의



(a) 지반 A : $V_p = 245$ m/sec



(b) 지반 D : $V_p = 857$ m/sec



(c) 지반 F : $V_p = 1900$ m/sec

그림 7. 관입 깊이 변화에 따른 지반 별 변위신호의 시간이력

강성이 커질수록 이러한 오차는 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 실제 SPT시험에서 선단부의 관입깊이가 0.6m 보다 작고, 또한 지반강성이 큰 경우에는 시추봉의 관입량이 작을 것으로 보아 상대적으로 강성이 작은 연약한 지반을 제외하고는 관입깊이의 변화가 진폭비에 미치는 영향은 그리 크지 않을 것으로 판단하였다. 그러나, 실제 실험에서 시추봉의 관입이 발생하지 않고 시추봉이 지반과 긴밀하게 밀착되어 있는 경우에 시추봉이 자유단 거동을 할 가능성이 있고, 그 결과 파형과 이에 따른 진폭비가 실제 지반의 강성을 반영하지 못하는 예외의 경우도 예상할 수 있었다.

3.3 시추공 깊이 변화

시추공의 깊이가 신호에 미치는 영향을 알아보기 위해서 그림 2(c)에 보인 바와 같은 시스템에 대해서 지반 조건을 각각 지반 A, 지반 D, 지반 F로 가정하고, 시추봉이 관입되지 않은 조건에서 시추공의 깊이가 각각

0m, 0.2m, 0.4m, 1m, 5m, 10m, 15m인 경우들에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 중 각 지반조건에 대한 속도신호를 그림 9에 시추공의 깊이 별로 정리하여 나타냈다. 이들 결과에서 판단할 때 속도신호는 시추공의 깊이에 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단되었다.

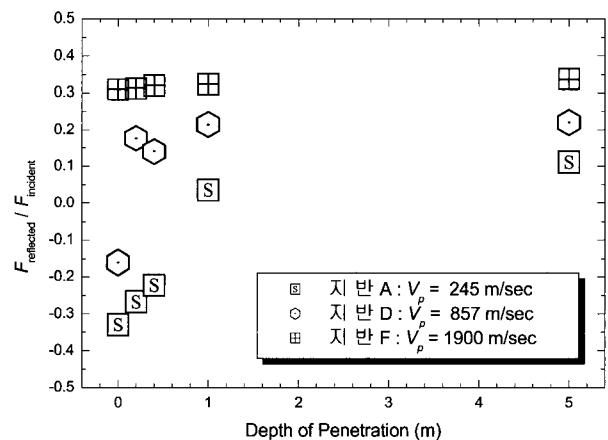
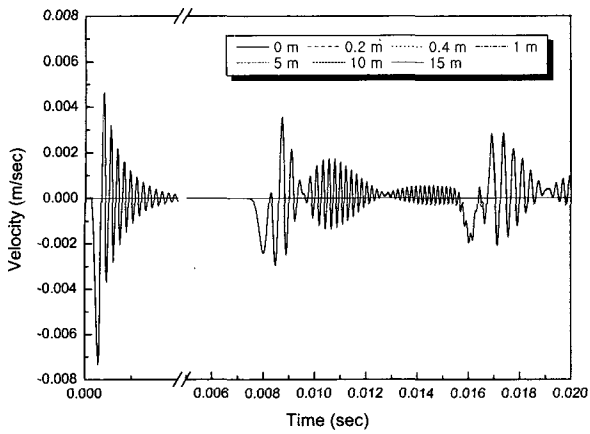
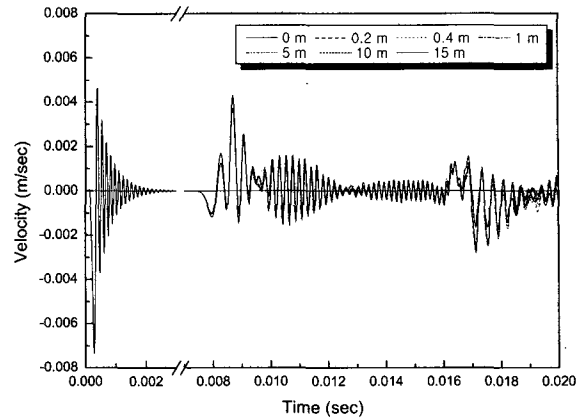


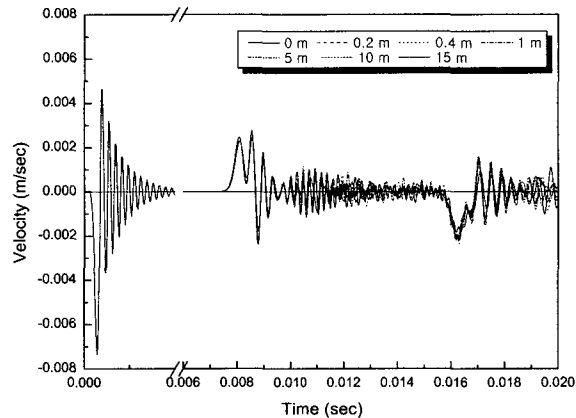
그림 8. 관입 깊이 변화에 따른 진폭비(F_{ref}/F_{in})의 변화



(a) 지반 A : $V_p = 245\text{m/sec}$



(b) 지반 D : $V_p = 857\text{m/sec}$



(c) 지반 F : $V_p = 1900\text{m/sec}$

그림 9. 시추공 깊이 변화에 따른 속도 신호의 변화

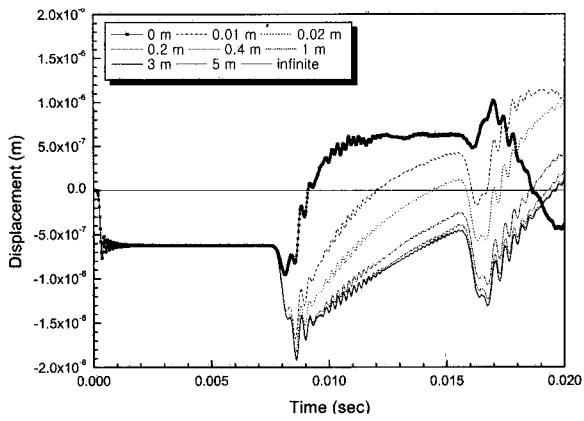
3.4 깊이에 따른 지반층의 강성변화

실제 지반은 깊이에 따라 다양한 종류의 지반층으로 구성되어 있다. 이와 같은 지반층의 구조 변화가 신호에 미치는 영향을 평가하기 위해서, 그림 2(d)에 보인 바와 같이 시추봉 선단 하의 임의의 깊이에서 지반의 특성이 변화하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 3.3절에서 시추공의 깊이가 약 0.4m 이상이면 신호에 미치는 영향이 작은 것으로 평가되었으므로, 이 절의 각 경우에 대해서 시추공의 깊이는 일률적으로 5m로 가정하였다. 시추공 바닥 깊이까지는 균질한 지반 A로 가정하였으며, 밑의 지반층은 지반 D 혹은 지반 F로 시추봉 선단으로부터 0m, 0.01m, 0.02m, 0.2m, 0.4m, 1m, 3m, 5m에 위치하는 각 조건들을 가정하였다.

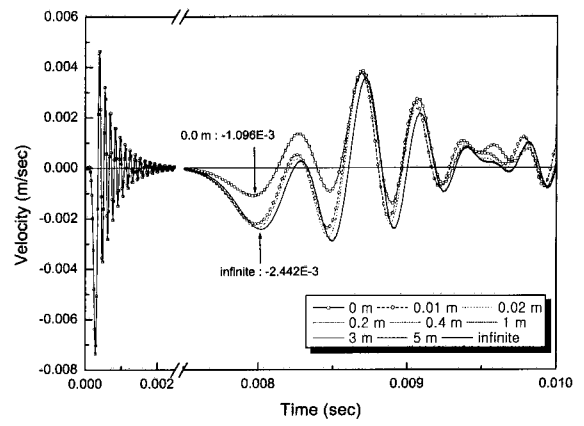
이들 조건에 대한 해석으로부터 얻은 변위신호와 속도신호를 지반 D인 경우에 대해서는 그림 10에, 지반 F인 경우에 대해서는 그림 11에 각각 나타냈다. 이들 그

림의 결과를 근거로 판단할 때 시추봉의 동적거동은 시추봉 선단에 직접 접해 있는 지반층의 강성에 의해 절대적으로 지배되는 것으로 알 수 있었다. 즉, 시추봉으로부터 하부층의 지반이 0.01m 정도로 이격되어 있는 경우에도 하부층의 강성이 시추봉의 동적거동에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이 절에서 수행한 해석에서 실제 SPT 시험 시 발생하는 시추봉의 지반 내 관입을 모델링하지 않았고, 따라서 시추봉을 통해 전파되는 파동이 시추봉의 선단과 접해 있는 지반의 변형을 크게 유발하지 않았기 때문으로 추정되었다. 이러한 해석상의 문제에 대해서는 추가의 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

위의 결과를 보다 상세히 살펴보기 위해서 그림 11(b)와 12(b)의 속도신호를 이용하여 각 경우에 대해서 입사파와 반사파의 진폭비($F_{\text{반}}/F_{\text{입}}$)를 추정한 결과를 표 4에 정리하였다. 이 결과에서 시추봉 선단과 하부지반과의 이격거리가 무한대인 경우에 대해서 구한 진폭비 -0.3321은

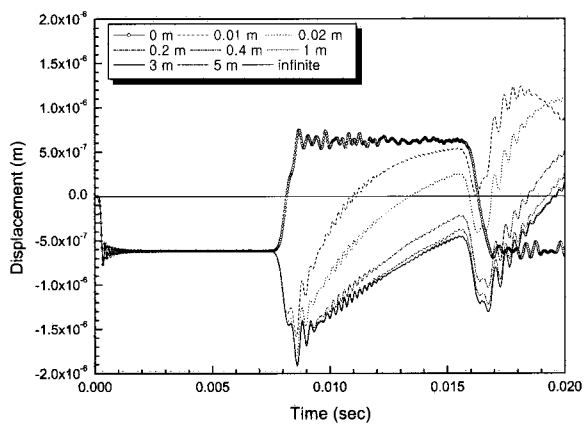


(a) 변위신호

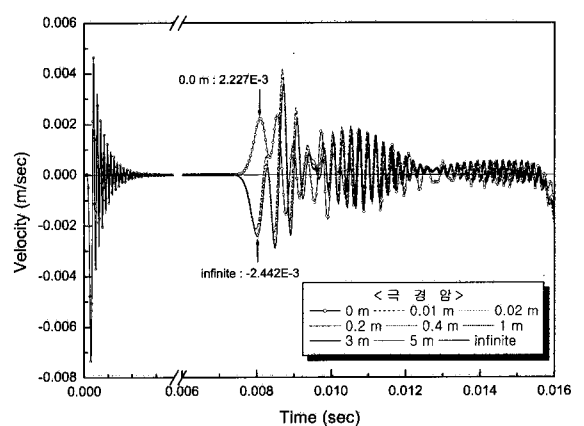


(b) 속도신호

그림 10. 시추봉 선단 하부가 지반 D ($V_p = 857\text{m/sec}$)인 경우의 신호



(a) 변위신호



(b) 속도신호

그림 11. 시추봉 선단 하부가 지반 F ($V_p = 1900\text{m/sec}$)인 경우의 신호

표 2의 지반 A에 대한 값 -0.3291 과 거의 일치하였다. 이격거리가 0m 인 경우의 진폭비는 지반 D와 지반 F의 경우들에 대해서 각각 -0.1491 과 0.3029 로 구해졌으며, 이들 값은 표 3의 지반 D의 경우인 -0.1608 , 지반 F의 경우인 0.3097 과 거의 일치하였다. 이들 경우를 제외하면 다른 경우에 대해서는 이격거리가 매우 작을 지라도 구해진 진폭비들은 이격거리가 무한대인 순수 지반 A의 경우와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 시추봉 선단 하의 임의 깊이에 이질 지반층이 존재하는 경우에도 시추봉의 선단과 접해

있는 지반의 강성을 추정하는 데는 어려움이 없을 것으로 판단되었다. 그러나, 상대적으로 선단과 직접 접해있지 않은 하부 지반층 강성은 힘신호의 진폭비로부터 직접 추정하기는 어렵고, 변위신호를 이용한 역해석 방법이 동원되어야 할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

4. SPT 동적 신호를 이용한 지반강성 추정방법 평가

본 논문의 3절에서 수행한 영향인자에 대한 연구결과를 바탕으로 시추봉을 통해 전파되는 입사파와 반사파

표 4. 시추봉 선단 하 이질 지반층의 존재에 따른 진폭비($F_{\text{반}}/F_{\text{입}}$)의 변화

이질 지반층 깊이(m)	지반 D ($V_p=857\text{m/sec}$)			지반 F ($V_p=1900\text{m/sec}$)		
	반사파 속도 $\times 10^{-3}$ (m/sec)	힘	$F_{\text{반}}/F_{\text{입}}$	반사파 속도 $\times 10^{-3}$ (m/sec)	힘	$F_{\text{반}}/F_{\text{입}}$
0	-1.096	-62.74	-0.1491	2.227	127.47	0.3029
∞	-2.442	-139.78	-0.3321	-2.442	-139.78	-0.3321

의 신호를 분석하여 지반강성을 추정하는 방법의 적용성을 검토하고자 하였다. 영향인자에 대한 연구결과, 시추봉의 관입깊이, 시추공의 깊이, 시추공 선단 하 임의 깊이에 존재하는 이질지반 등의 영향인자는 시추봉의 선단에서 발생하는 반사파 신호에 대해서 크게 영향을 미치지 않을 것으로 나타났다. 반면에 시추봉과 직접 접촉하고 있는 지반강성은 반사파 신호에 대해서 지배적인 영향을 미치는 주요인자인 것으로 나타났다. 따라서 이 절에서는 다른 복잡한 영향인자들을 배제하고 지반 조건의 변화에 따른 입사파와 반사파의 진폭비의 변화를 보다 상세히 알아보려고 하였다. 이러한 목적으로 그림 2(a)에 보인 시추봉의 선단이 지표면에 접해 있는 시스템에 대해서 앞서 수행한 표 1의 지반 A, D, F의 경우에 추가하여 지반 B, C, E의 경우들에 대한 해석을 수행하였다.

이들 경우에 대해서 시추봉과 지반의 경계면에서 발생하는 입사파와 반사파의 속도신호를 이용하여 입사파와 반사파의 진폭비를 구했다. 다음에 식 (4)의 관계를 이용하여 시추봉과 지반간의 임피던스 비(α)를 추정하였다. 또한, 시추봉의 임피던스($57.24\text{kN} \cdot \text{sec}/\text{m}$)는 아는 값이므로 결정된 임피던스 비(α)로부터 식 (3)의 관계를 이용하여 지반의 임피던스($Z_s = \frac{A_s E_s}{V_{p,s}} = A_s \sqrt{\rho_s E_s}$, 여기서 s는 지반을 지칭함)를 추정하였다. 이러한 과정에서 얻은 결과들을 종합하여 표 5에 정리하였다.

표 5에 보인 바와 같이 구한 지반의 임피던스가 신뢰도를 갖기 위해서는 임피던스비(α)와 입사파와 반사파의 진폭비(F_{ref}/F_{in})를 연관짓는 식 (4)의 관계가 실제 SPT 실험조건에서 얻는 신호에 대해서도 적절하다는 전제 조건이 선행되어야 한다. 실제 SPT 실험조건에서는 지반의 경계조건이 그림 4에 보인 바와 같은 이질재료에 대한 경계조건과는 상이하며 표 4에서 구한 지반

임피던스의 신뢰도는 낮을 것으로 판단되었다. 결과적으로 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 실제 SPT 시험조건에 대한 임피던스 비(α)와 진폭비(F_{ref}/F_{in})간의 관계식의 정립에 관한 추가연구가 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

위와 같은 문제점에도 불구하고, 본 논문에서는 우선 식 (4)의 관계가 어느 정도 성립할 것이라는 가정 하에서 현재까지의 연구결과에 근거하여 지반의 임피던스(Z)로부터 탄성변형계수(E) 혹은 전단변형계수(G)를 추정하는 방법에 대해서 지반조건이 미치는 영향을 분석해 보고자 하였다. 이러한 분석의 이유는 지반의 임피던스로부터 변형계수를 추정하기 위해서는 지반의 밀도 및 포아송비와 더불어서 입사파의 반사에 공헌하는 지반의 유효면적(A_s)이 입력되어야 하기 때문이다. 이들 변수 중에서 밀도와 포아송비는 큰 오차없이 가정할 수 있겠지만 A_s 에 대해서는 조사된 바 없다. A_s 값은 지반의 특성에 따라서 크게 영향을 받을 것으로 예상되므로 이들간의 관계를 분석해보고자 하였다. 이러한 목적으로 표 5에 보인 지반의 임피던스로부터 A_s 값을 역추정하고 시추봉의 면적(0.00159m^2)에 대해 정규화한 값을 같은 표에 정리하였다. 이렇게 구한 결과를 시추봉과 지반의 임피던스비 변화에 대한 지반유효면적비(A_s/A_r)의 변화로 그림 12에 나타냈다.

그림 12의 결과를 보면, 시추봉과 지반간의 임피던스비에 공헌하는 지반의 유효면적은 지반강성이 증가할수록 감소하는 추세를 보이는 것으로 나타났다. 그러나, 현재까지의 연구단계에서 식 (4)의 관계로 구한 임피던스비의 신뢰도가 낮으므로 이 그림에 보인 임피던스비에 대한 유효면적 관계를 정량적 수식으로 나타내는 것은 의미가 없는 것으로 판단되었다. 그림에도 불구하고 실제로 이들 관계의 대체적인 경향은 크게 변화하지는 않을 것으로 예상되었다. 실제 SPT 시험조건에 대한 임피던스 비(α)와

표 5. 입사파와 반사파 신호로부터 추정된 지반의 임피던스와 유효면적

지반조건 (V_p , m/sec)	반사파		F_{ref}/F_{in}	임피던스비 α	지반의 임피던스 Z_s ($\text{kN} \cdot \text{sec} / \text{m}$)	$E_s/V_{p,s}$ ($\text{kN} \cdot \text{sec}/\text{m}^3$)	유효면적 A_s (m^2)	유효 면적비 A_s/A_r
	반사파속도 $\times 10^{-3}(\text{m}/\text{sec})$	힘(N)						
지반 A (245)	-2.420	-138.5	-0.3291	0.5048	28.89	204	0.1416	89.06
지반 B (465)	-2.305	-131.9	-0.3135	0.5226	29.91	413	0.07242	45.55
지반 C (612)	-2.095	-120.0	-0.2852	0.5562	31.84	557	0.05716	35.95
지반 D (857)	-1.182	-67.66	-0.1608	0.7229	41.38	840	0.04926	30.98
지반 E (741)	-1.340	-76.70	-0.1822	0.6918	39.60	1599	0.02477	15.58
지반 F (1900)	2.277	130.33	0.3097	1.897	108.58	4474	0.02427	15.26

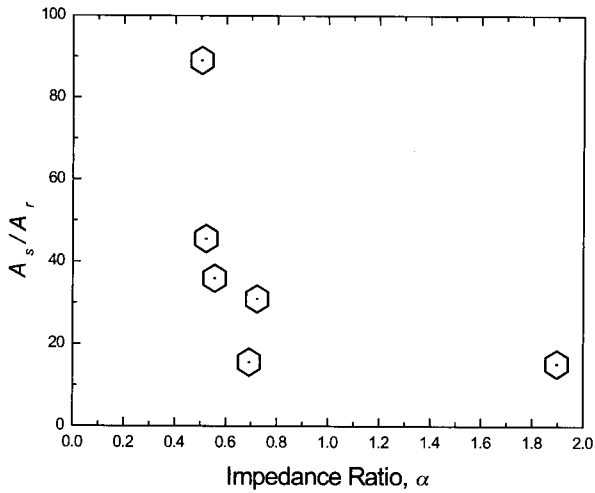


그림 12. 시추봉과 지반 간의 임피던스 비(α) 변화에 따른 지반유효면적비 (A_s/A_r)의 변화

진폭비($F_{\text{부}}/F_{\text{기}}$)의 관계식이 정립되는 경우에 이들의 관계도 더욱 명확해 질 것으로 판단되었다.

5. 결 론

표준관입시험 시 향타로 인해 시추봉 두부에서 발생하는 응력파가 시추봉 선단과 접해 있는 지반에서 반사되어 돌아오는 동적신호를 분석함으로써, 시추봉 선단부에 인접한 지반의 임피던스(강성)에 관해 보다 상세한 정보를 얻고자 하는 시험방법의 가능성을 타진하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 실제 SPT시험조건을 간단하게 모델링한 시추봉-지반시스템에 대해서 동적해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시추봉과 지반의 접촉면에서 입사, 반사되는 파동의 진폭비에 가장 심각하게 영향을 미치는 인자는 시추봉 선단과 접촉한 지반강성의 변화이고, 그 외 본 논문에서 조사한 인자들인 시추봉의 관입깊이, 시추공의 깊이, 시추봉의 선단 하에서 층이 진 이질 지반의 존재 등은 심각한 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다.
- (2) 시추봉과 지반의 접촉면에서 입사, 반사되는 파동의

진폭비($F_{\text{부}}/F_{\text{기}}$)는 시추봉과 지반 간의 임피던스 비(α)의 변화를 반영하고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 국한된 면적을 가진 1차원 재료들의 경계면에 대해서 유도된 이들 간의 관계식(식 4)을 이용하여 추정된 지반의 임피던스는 신뢰도가 낮을 것으로 판단되었다.

- (3) 임피던스를 구성하는 요소 중, 지반의 유효면적(A_s)은 지반강성이 증가함에 따라 감소하다가 강성이 매우 커지는 경우에는 변화가 크게 없는 일정한 값의 범위로 수렴하는 추세를 보였다.
- (4) SPT 동적신호를 분석하여 시추봉 선단과 직접 접해 있는 지반에 대한 임피던스와 변형계수를 추정할 수 있는 가능성이 있다는 결론을 얻었다. 그러나 이 방법의 신뢰도를 향상시켜 실무에 적용하기 위해서는 실제 SPT 시험조건에 타당한 임피던스 비와 입사파와 반사파의 진폭비 간의 관계를 명확히 하고, 또한 시추봉과 지반의 경계면에서 파동의 전달에 공헌하는 지반 유효면적의 결정을 위한 추가 연구의 수행이 요구된다는 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 SK건설연구소의 “SPT 동적데이터 분석에 관한 기초연구” 과제의 일부 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영수(2002), SPT 동적데이터 활용을 위한 해석적 연구, 석사학위논문, 공주대학교.
2. SK건설(주)연구소(2001), SPT 동적데이터 분석에 관한 기초연구, 연구보고서.
3. Clayton, C. R. I.(1990), “SPT Energy Transmission: Theory, Measurement and Significance”, *Ground Engineering*, pp. 35-43.
4. Goble, G. and Abou-matar, H. (1992), “Determination of Wave Equation Soil Constants from the Standard Penetration Test”, *Proceeding, Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Netherlands, pp.99-103.

(접수일자 2002. 3. 7, 심사완료일 2002. 5. 10)