

다변수 실험계획법을 이용한 진동침하 영향 요소 연구

Investigation of Factors Affecting Vibration Induced Settlement
Using Multifactorial Experimental Design

김 동 수*¹

Kim, Dong-Soo

Drabkin Sergey*²

Abstract

Settlement induced by low-level vibration on granular soils is too complex to predict with one or two factors. Factors affecting vibration induced settlement were investigated, and a settlement prediction model on granular soils was developed using multifactorial experimental design(MED). Factors such as vibration amplitude, deviatoric stress, confining pressure, soil gradation, duration of vibration, moisture content, and relative density were considered in this study. A special vibratory frame was designed to shake a soil specimen within a triaxial cell. MED allowed the authors to investigate the effect of many factors using a relatively small number of experiments. The most significant factors on settlement were vibration amplitude, confining pressure, and deviatoric stress. Comparable settlement was occurred even under low-level vibration ranging from 2.5 to 18mm/sec, and stress anisotropy was found to be an important factor on settlement.

요 지

미소지반 진동에 의해 사질토에서 유발되는 지반 침하는 많은 영향요소들의 복합작용에 의해 일어난다. 본 연구에서는 이들 영향요소들에 대하여 알아보고, 다변수 실험계획법을 이용하여 사질토에서 진동침하 예측모델을 개발하였다. 예측모델에 사용된 변수로는 진동의 크기, 축차응력, 구속응력, 입자분포, 진동지속시간, 함수비, 상대밀도 등이다. 여러변수들을 실험적으로 고려하기 위하여 특수제작된 진동 프레임을 이용하여 삼축셀안의 공시체에 진동을 가하였다. 다변수 실험계획법을 이용하여 비교적 작은 실험양으로 많은 변수들이 진동 침하에 미치는 영향을 연구하였다. 진동침하에 영향을 미치는 중요 요소는 진동의 크기, 구속응력, 축차응력 등이 있다. 진동의 크기가 2.5~18mm/sec의 범위에 있는 미소지반 진동에 의해서도 상당한 침하가 유발되었고 현장응력의 이방성이 진동침하에 많은 영향을 주었다.

*¹ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

*² 미국 Polytechnic University 연구원

1. 서론

최근 도심지에서 각종 토목, 건축공사나 교통하중으로 야기되는 지반 진동에 의한 인접 구조물의 손상과 관련된 진동피해 민원이 다발하고 있다. 특히 도심재개발, 지하철 및 도로공사 등 사회간접자본의 확충으로 야기되는 발파 및 말뚝항타 등에 의한 건설진동과 지하철, 과적차량, 고속전철에서 발생하는 차량 진동에 의한 진동피해가 예상되므로, 진동피해를 경감할 수 있는 실질적 대책의 마련이 요구된다.

지반 진동에 의한 인접구조물의 피해는 진동파의 직접 전달에 의한 구조물의 손상과 지반다짐으로 야기되는 부등 침하에 의한 손상으로 나누어 생각할 수 있다. 현재 통용되고 있는 국내외의 진동규제 기준은 주로 채광 발파에 의한 진동파의 직접 전달에 의한 손상 데이터를 중심으로 정립된 것으로 도심지에서 발생하는 건설, 기계, 차량진동 등 저변위 지속진동 문제에 적용하기에는 문제점이 많다(우제윤, 1993, Edwards & Northwood, 1960, Siskind. et al, 1980). 또한 최근 미국의 도심지 공사 사례연구에 의하면 말뚝 항타에 의한 건설진동이 허용기준 이내에 있더라도 인접구조물이 심각한 손상을 입은 사례가 보고되었다. 이들 경우에는 진동파의 직접 전달에 의한 영향보다는 지반 다짐에 의한 구조물의 부등 침하가 대표적 손상원인이었다.(Dowding, 1991a, Lacy & Gould, 1985, Leathers, 1994, Linehan. et. al., 1992).

도심지에서 미소지반 진동에 의한 침하는 진동원의 특성(진동원의 위치, 진폭, 주기 및 지속시간), 지반내의 구속응력(등방 및 이방 구속압), 지반의 물성치(입자분포, 상대밀도, 함수비), 지형조건(굴착사면, 지하수위)등의

상호작용에 의해 유발되므로 지반 침하를 예측하기 위해서는 이들 요소들의 복합적인 영향을 고려하여야 한다.(Kim & Drabkin, 1993, Kim. et al., 1994). 이들 영향 요소들을 고려하여 고전적인 실험 방법으로 모델을 개발하려면 많은 양의 실험이 필요하여 현실적으로 불가능하나 통계적 접근 방법에 기본을 둔 다변수 실험계획법(Multifactorial Experimental Design)을 이용하면 실험의 양을 줄이며 모델을 개발하여 각 요소들의 상호작용을 연구할 수 있다(Box & Hunter, 1978, Box & Draper, 1987, Fisher, 1935).

본 논문에서는 도심지 토건구조물의 안전에 미치는 미소 진동에 의한 주변 침하의 중요성과 진동침하 영향요소들을 살펴보고, 이들 영향요소들의 상호작용을 고려한 사질토의 침하 예측모델을 다변수 실험계획법을 이용하여 개발하였다. 대상 진동의 크기는 2.5~18mm/sec의 범위로 설정하였으며 특수 진동시험장치를 제작하여 다양한 변수들을 실험적으로 고려하였다. 개발된 예측 모델을 이용하여 영향 요소들이 침하에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 연구배경

2.1 진동규제기준

진동의 허용 수준을 결정하기 위하여 진동의 크기를 나타내는 방법으로는 변위, 속도, 가속도 등 3가지의 척도가 있다. 지금까지의 연구 결과를 살펴보면 구조물과 인체에 대한 영향 정도를 평가하기 위하여는 지반의 최대입자속도(peak particle velocity) 성분이 가장 관련성이 큰 것으로 나타나고 있다.

독일, 스위스, 스웨덴 등 환경문화의식이 높은 서유럽 국가에서는 오래 전부터 각 국가에

맞는 진동허용기준을 설정하고 진동을 억제하기 위한 노력을 기울여 왔다. 최근에는 대부분의 기준이 입자속도뿐 아니라 구조물의 종류, 진동지속시간, 진동 주파수 범위 등을 고려하여 진동 기준치를 체계적으로 정립하고 제정하고 있다. 미국은 국가에서 제정한 진동기준없이 채광발파에 의한 피해 상황을 정리한 미광무국 기준이 통용되고 있다. 미국의 진동 기준은 서유럽 국가와 비교하여 덜 엄격한 것으로 알려져 있다. 그림 1은 독일의 기준과 미광무국 기준을 비교하였다.

현재 사용되고 있는 진동규제기준은 채광 발파에서 발생하는 진동파의 직접 전달에 의한 구조물의 손상 데이터를 중심으로 정립되어 있어, 도심지 진동에서 문제가 되는 미소 진동에 의한 지반 침하에 관한 영향은 거의 고려되지 않고 있다. 더욱이 매개체인 지반의 동적 물성치의 영향 및 지반 진동 측정법에 관한 고려는 미비한 실정이다.

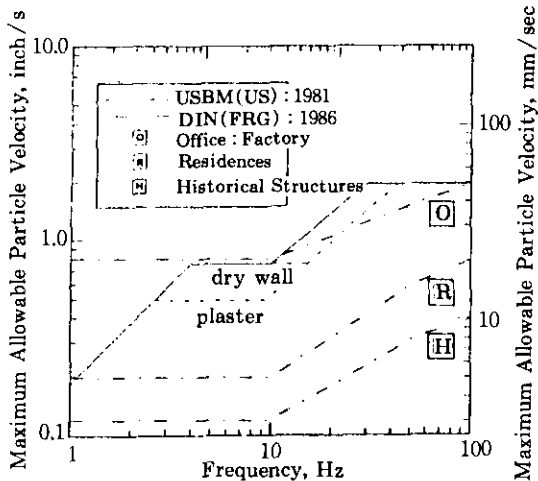


그림 1. USBM/DIN 기준의 허용 진동 기준 비교

2.2. 진동 침하의 중요성

지반 진동에 의한 인접 구조물의 피해는 진동파의 직접 전달에 의한 구조물의 손상과 지반 다짐으로 야기되는 부등 침하에 의한 손상으로 나누어 생각할 수 있다. 사질토의 경우,

진동파의 직접 전달보다 지반 다짐의 영향이 인접 건물이나 매설관들의 주된 손상 원인이 되고 있으나, 현재 통용되고 있는 대부분의 진동 기준은 구조물의 재질이 진동파에 의해 발생하는 응력을 얼마나 견딜 수 있느냐에 초점이 맞추어져 있으므로, 도심지에서 반복적으로 작용하는 미소 진동에 의하여 인접 건물이 손상을 입는 경우를 쉽게 접할 수 있다.

Lacy와 Gould의 사례 연구(Lacy & Gould, 1985)에 의하면 현장 측정된 진동 레벨이 현재 미국에서 통용되는 진동 기준치 보다 훨씬 적은 2~18mm/sec의 저진동에서도 주위 건물이 손상을 입는 경우들이 보고되었으며 이들 경우에 상당한 지반 침하가 기록되었다. 특히 도심지 공사에서 흔히 볼 수 있는 지반 굴착이 이루어진 경우, 인접지반이 측방 구속을 상실하여 발생하는 정적인 침하는 물론, 지반 구속 상태가 느슨해짐에 따라 진동 침하가 증가하여 상당한 피해를 유발할 수 있다.(Dowding, 1991b, Lacy & Gould, 1985). Linehan 등의 연구에 의하면 건설 진동이나 교통 진동에 의해 지하 매설 시설(underground utility)이 입는 손상의 주된 원인은 진동파의 직접 전달에 의한 것이 아닌, 진동에 의한 측방 변위 및 침하에 의한 것이었다.

2.3. 진동침하 영향요소

2.3.1. 진동의 특성

- 진동원의 종류 : 도심지에서 발생하는 진동원은 특성에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다. 진동의 주기성 및 지속시간에 따라 일시(transient)진동과 지속(steady-state) 진동으로, 진동의 전파경로에 따라 지표면(surface) 진동과 지중(in-depth) 진동으로 나누어진다. 예를 들면, 도로에서 발생하는 교통 진동은 지표면 지속진동으로, 지하철 진동은 지중 지속진동으로 구분되고 말뚝항타의 경우 진동원의 깊이가 계속 변하므로 깊이 변화에 의한 영향도 고려하여야 한다. 진동원의 종류에 따

라 인접구조물의 안정성에 상이한 영향을 미치므로 진동원 종류별(source dependent) 진동평가 방법의 개발이 필요하다.

- 진폭 : 현재 사용중인 진동규제기준에서 적용되는 유일한 요소로 진동입자속도 (particle velocity)로 표시한다. 본 연구에서는 2.5~18mm/sec 범위의 미소 진동을 대상으로 하였다. 도심지 사례연구에 의하면 이 범위 진동에서 예상치 못했던 진동 침하에 의한 인접구조물의 손상이 대부분 발생하였다.
- 진동주파수 : 진동의 탁월주파수(dominant frequency)와 구조물의 고유 진동수가 일치하면 구조물이 공진을 일으키는 것은 기지의 사실이다. 도심지에서 대표적 진동원에 대한 주파수 응답해석에 대한 연구가 필요하며 이를 바탕으로 구조물의 고유 진동수와 진동원의 탁월 주파수 대역을 동시에 고려한 구조물 피해양상에 대한 연구자료(data base)가 확립되어야 한다. 일단 자료가 확립되면 피해 유발 주파수 범위를 피하는 방향으로 효과적인 진동규제가 가능하다. 한편 Youd(1970)의 실험 결과에 의하면 사질토의 침하는 진동주파수의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다 (Youd, 1970).
- 진동 반복 회수 : 저 진동의 경우 일시적인 진동에 의해서는 큰 침하가 발생하지 않을 지라도 오랜 시간 동안 지속적으로 반복되면 사질토의 경우 작은 진폭에서도 큰 침하를 유발할 수 있다.
- 감쇠특성 : 진동은 진원으로 부터 거리가 멀어짐에 따라 에너지가 감소하는 특성을 갖는데 이를 감쇠 특성이라 하며 이는 지반의 기하학적 감쇠 특성과 재료 감쇠 특성에 의한 것이다.

2.3.2 현장 지반조건

지금까지는 진동의 매개체인 지반의 응력상태 및 물성치 등 현장 지반 조건에 대한 고려 없이 많은 연구가 수행되었다. 그러나 이들이

진동 침하에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

- 현장응력상태 : 지반의 깊이에 따라 구속 응력이 변하며, 구조물에 의한 상재하중이나 지반의 굴착에 의한 수평하중의 감소로 인하여 지반의 응력상태가 비등방성을 나타낸다. 이들 현장응력 상태가 진동침하에 중요한 영향을 미치며 이들 응력을 묘사하기 위하여 등방구속응력과 축차응력을 적용하였다. 구속응력과 축차응력의 조합을 이루어 대상 지반의 토압계수를 등방상태에서 최대 비등방 상태까지 광범위하게 변화시킬 수 있다.
- 상대밀도 : 침하의 가능성을 예측하는 가장 중추적인 요소로, 현장 상태에서 상대 밀도가 55% 이하인 경우 미소진동에 의하여 침하가 발생할 가능성은 매우 높다.
- 입도분포 : 세립토 성분이 적은 사질토의 경우 점성토와 비교하여 진동침하에 민감하다. 사례연구에 의하면 진동침하에 민감한 입도분포는 좁은 밴드대역의 입도분포가 불량한 사질토로 액상화에 민감한 영역과 일치한다.
- 함수비와 배수조건 : 현장의 함수비와 지하수위, 배수조건은 진동에 의하여 발생된 간극 수압의 증가와 관련된 요소이다. 포화된 사질토에서 진동 진폭이 한계값(threshold value)을 초과하면 간극수압 증가를 유발하여 지반의 침하를 더욱 악화시킬 수 있다.

3. 진동침하 예측모델

3.1 다변수 실험계획법

도심지에서 진동에 의한 지반 침하는 많은 요소들의 상호작용에 의해 유발되므로 지반 침하를 예측하기 위해서는 이들 요소들의 복합적인 영향을 고려하여야 한다. 이들 영향요소들을 고려하여 고전적인 실험방법으로 모델을 개발하려면 많은 양의 실험이 필요하며 현실적으

로 불가능하나 통계적인 접근 방법에 기본을 둔 다변수 실험계획법(multifactorial experimental design, MED)을 이용하면 실험의 양을 줄이며 모델을 개발하여 각 요소들의 상호작용을 연구할 수 있다.

MED의 기본 취지는 각기 다른 실험 변수의 영향을 알기 위하여 수 많은 별도의 시험들을 수행하는 대신에 단일 실험계획으로 이들 변수들의 영향을 연구하는데 있다. MED에서 사용되는 용어들을 살펴보면 다음과 같다 : 실험(experiment)이란 여러 요소(parameter)들이 응답(response)에 미치는 영향을 평가하기 위한 작업(trial)을 의미한다. 요소들은 변수(factor)와 잡음(noise)으로 구분된다. 실험계획(experimental design)이란 일련의 작업의 조합을 의미하며 각 작업은 실험에서 사용되는 각 변수들의 레벨을 지정함으로써 결정된다. 변수레벨은 영향요소들의 가능한 모든 범위의 setting들에서 선택된 부분집합이다.

전체 인수 실험계획(full factorial experimental design)에서는 각 변수의 레벨을 정하고 변수 레벨의 모든 조합을 시험한다. 이 방법은 방대한 양의 정보를 얻을 수 있는 방법이나 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 부분 인수 실험 계획(fractional factorial experimental design)에서는 전체 실험배열(array)에서 특정한 부분 집합들만을 고려하여 시험함으로써 실험 개수를 줄일 수 있다.

대부분의 통계적 실험계획은 행(row)에서 각 시험의 조건을 나열하고 열(column)을 변수로 할당하는 행렬 형태를 갖고 있다. orthogonal 실험 행렬에서는 각 변수들이 응답에 미치는 영향을 독립적으로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 Brodskii(1976)에 의해 개발된 $2^n \times 3^m$ D-optimal orthogonal 실험 계획을 사용하였다. n개의 정성적 변수는 2개의 레벨로 m개의 정량적 변수는 3개의 레벨로 변화시킨다. 이 방법은 orthogonal 행렬을 이용한 부분인수 실험 계획법의 한 방법으로 7개의 변수가 침하에 미치는 영향을 연구하는데 단지 27개의 실험

회수만을 필요로 한다.

3.2 실험변수

MED에서 사용한 변수로는 진동의 크기, 축차응력, 구속응력, 입도분포, 진동회수, 함수비 및 상대밀도 7가지이다. 이들 중 함수비 및 상대밀도는 정성적 변수로 취급하였고 나머지는 정량적 변수로 간주하였다. 정량적 변수는 3개의 변수 레벨에서 시험되었고 각 레벨은 5%편차 이내에서 독립적이어야 하고 각기 변수의 조합을 공시체에 가하였을 때 진동 시험전에 평형상태에 도달하여야 한다. 본 연구에서 사용된 변수의 종류와 실험변위(변수 레벨)를 표 1에 나타내었다.

변수 레벨은 시험계획행렬(experimental design matrix)작성시 ID값(identification value)을 사용하여 나타낸다. 정량적 변수의 최대, 중간, 최소레벨을 0, 1, 2로 표시하였고 정성적 변수는 -1과 2로 표시한다.

3종류의 입도분포를 가진 시질토를 실험에 사용하였다 : 1) 조립모래, 2) 세립모래, 3) 혼합모래. 각 시료의 입도분포곡선은 그림 2에 나타나 있고 물성치는 표2에 정리하였다. 본 연구에서 사용된 사질토와 다른 입경의 크기를 갖는 사질토의 경우 상대밀도는 사질토의 진동침하에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 본 실험에는 입도분포, 함수비 정도 및 시료 성형

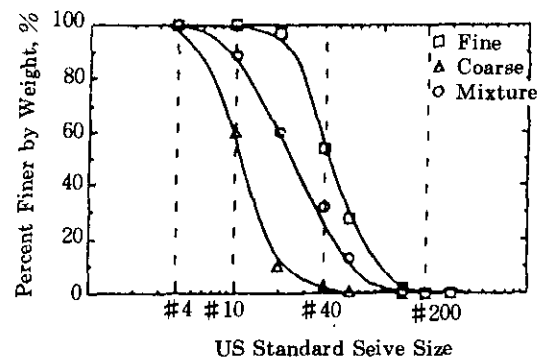


그림 2. 실험에 사용된 각 시료의 입도분포 곡선

표 1. MED에 사용한 변수의 종류와 실험범위

#	실험변수	SI 단위	US 단위	실험계획(표4)에서 ID값	Orthogonal 행렬(표5)과 식 5에서 코드값	Comments
1	진동진폭 (cm/sec)	1.8cm/sec	0.7in/sec	0	1	정량변수
		1.0	0.4	1	0	
		0.25	0.1	2	-1	
2	축차응력 (kPa)	104	15	0	1	정량변수
		59	8.5	1	0	
		14	2	2	-1	
3	구속응력 (kPa)	207	30	0	1	정량변수
		138	20	1	0	
		69	10	2	-1	
4	입도분포	Fine		0	1	정량변수
		1:1 mix		1	0	
		Coarse		2	-1	
5	진동지속시간 (sec)	9000		0	1	정량변수
		4500		1	0	
		1		2	-1	
6	함수비분포	Dry		0	-1	정성변수
		Moist		1	2	
7	상대밀도	Loose		0	-1	정성변수
		Medium dense		1	2	

표 2. 실험에 사용한 사질토의 물성치

사질토	D50 mm	최대 건조 단위 중량(kg/m ³)	최소 건조 단위 중량(kg/m ³)
세립모래	0.5	1704	1507
혼합모래	0.7	1860	1702
조립모래	1.7	1702	1577

표 3. 시료성형방법에 따른 초기 밀도

입도 분포	함수비 정도	시료 성형 방법	
		Funnel 성형	Sieve 성형
		초기 상대 밀도(%)	
조립모래	Dry	37	67
	Moist	34	62
세립모래	Dry	61	84
	Moist	47	65
혼합모래	Dry	45	70
	Moist	48	62

방법에 따른 차이를 보이는데, MED 방식에서 정량적 변수의 편차인 5% 이내에서 상대밀도의 조절이 불가능하여 정성적 변수로 취급하였다. 느슨한 사질토 시료의 성형에는 깔대기(funnel)를 사용하였고 중간 정도 밀도의 시료 성형을 위하여는 체(sieve)를 통한 낙하방법을 사용하였다. 성형방법에 따른 각 시료의 초기 밀도를 표3에 요약하였다.

3.3. 실험장비

진동침하에 영향을 미치는 여러 변수들을 실험적으로 고려하기 위하여 그림 3과 같은 특수한 시험장비를 개발하였다. 특수 제작된 진동 프레임을 이용하여 진동 테이블에 부착된 삼축 셀 안에 직경 7.1cm, 높이 15cm의 공시체를 설치하였다. 진동 테이블은 60Hz의 주파수로 수직 진동을 작동시켰다. Youd(1970)의 실험결

과에 의하면 사질토의 침하는 진동 주파수의 영향을 받지 않으므로 진동 테이블이 최고의 효력으로 작동하는 주파수를 선택하였다. 예비 시험을 수행하여 진동 감지기를 시료 내부와 삼축셀 위에 놓고 시험한 결과 같은 진동이 감지 되었으므로 본 시험에서는 진동 감지기를 삼축셀 위에 설치하여 수행하였다. 진동의 측정 방향은 수직방향이고 수평성분은 측정하지 못하였으나, 수직진동의 크기에 비하여 상당히 작을 것으로 판단된다. 다양한 응력 조건을 묘사하기 위하여 등방 조건은 물론 비등방 조건에서 수행하였다. 공기압으로 셀 내부에 등방 구속압을 가하였고 마찰이 적은 Air piston에 의해 축차응력을 작용시켰다. 진동에 의해 유발되는 침하는 LVDT를 사용하여 지속적으로 계측하였다.

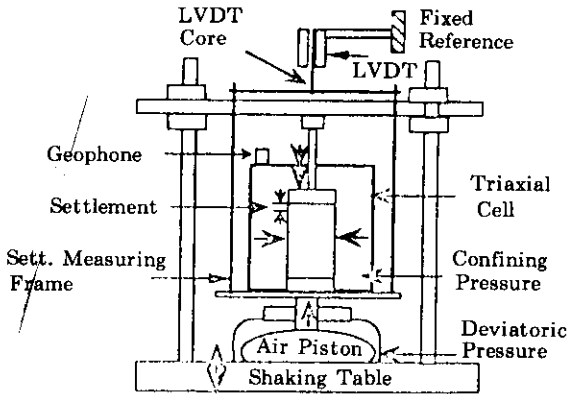


그림 3. 실험장비 개요도

3.4 침하 예측모델 개발

5개의 정량적 변수와 2개의 정성적 변수가 침하에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Brodskii에 의해 제안된 $2^2 \times 3^5$ 다변수 실험 계획법을 사용하였다. 이 방법에서는 모든 변수의 선형 효과와 정량적 변수의 2차 비선형 효과를 고려할 수 있다. 우선 침하모델이 다음과 같은 다항식의 형태를 갖는다고 가정한다.

$$Y = b_0 + \Sigma(b_i x_i + b_{ii} z_i) + \Sigma b_{ij} x_i \quad (3)$$

여기서 Y =침하량, b_0 , b_i 와 b_{ii} =회귀분석 계수 x_i =변수의 코드값, $z_i = (3x_i^2 - 2)$ 이다. 방정식 3에서 두번째 항은 정량적 변수의 효과이다. 7개의 변수가 침하에 미치는 영향을 구하기 위해 27번의 실험이 필요하다. Brodskii에 의해 제안된 방법을 따라 실험 계획행렬을 표 4와 같이 구하였다. 실험계획행렬에서 ID값을 코드값으로 대체하면 표5와 같은 orthogonal 행렬이 되어 통계적 처리를 간단하게 만든다.

일단 실험계획 행렬이 구해지면 실험순서에서 유발되는 편견(bias)를 제거하기 위하여 실험을 무작위 순서(randomized order)에 따라 수행하였다. 또한 통계적 처리를 위하여 각각의 실험을 두번씩 수행하여 두 시험에서 얻은 침하량의 평균치를 표4에 나타내었다.

실험계획 행렬이 orthogonal 행렬이므로 식 3의 회귀분석 계수는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{27} y_u}{27}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{27} [x_{ui} y_{ui}]}{\sum_{u=1}^{27} x_{ui}^2}, \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^{27} [z_{ui} y_{ui}]}{\sum_{u=1}^{27} z_{ui}^2} \quad (4)$$

여기서, Y_u 는 실험에서 계측된 평균 침하량이고 x_{ui} 와 z_{ui} 는 실험행렬 중 u 번째 행에서의 x_i 와 z_i 의 값이다. 표4에 나타난 실험결과를 대입하면 다음과 같은 침하 예측모델을 얻을 수 있다.

$$Y_{in} = 2.27 + 1.19x_1 - 0.71x_1^2 + 0.49x_2 - 0.68x_2^2 - 0.80x_3 + 1.09x_3^2 - 0.46x_4 + 0.06x_4^2 + 0.45x_5 - 0.38x_5^2 - 0.19x_6 - 0.10x_7 \quad (5)$$

여기서,

$Y_{in} = \ln(Y)$ 이고 Y 의 단위는 0.001in이다.

x_i 는 i 번째 변수의 코드값으로 표1에 정의되었다.

개발된 모델의 통계적 적합성을 평가하기 위하여 Fisher(F) 기준을 사용하였다(Box, 1978, Box, 1987). Fisher 기준에 의하면 99%의 sig-

표 4. 실험계획 행렬

Test run number	Experimental design matrix							Settlement (natural logarithm)			
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	Observed average from two tests y _{ln u} (0.001 in.)	Calculated Y _{ln}		
									using Equation 5 (0.001 in.)	expressed in SI units (0.001 cm)	
1	24	0	0	0	0	0	0	0	2.944	2.720	3.652
2	14	1	0	0	1	1	1	1	0.000	1.981	2.913
3	2	2	0	0	2	2	0	0	0.000	0.349	1.281
4	12	0	1	0	1	2	1	0	2.944	1.829	2.761
5	18	1	1	0	2	0	0	0	2.773	3.344	4.276
6	25	2	1	0	0	1	0	1	0.693	0.445	1.377
7	13	0	2	0	2	1	0	1	3.434	2.588	3.520
8	21	1	2	0	0	2	0	0	0.000	0.349	1.281
9	19	2	2	0	1	0	1	0	0.000	-0.822	0.110
10	9	0	0	1	0	0	1	1	0.000	1.861	2.799
11	8	1	0	1	1	1	0	0	4.094	2.271	3.203
12	22	2	0	1	2	2	0	0	0.000	0.064	0.996
13	10	0	1	1	1	2	0	0	1.609	2.119	3.051
14	17	1	1	1	2	0	0	1	3.829	3.059	3.991
15	7	2	1	1	0	1	1	0	0.000	-0.414	0.518
16	15	0	2	1	2	1	0	0	0.693	2.304	3.236
17	1	1	2	1	0	2	1	0	0.000	-0.510	0.422
18	6	2	2	1	1	0	0	1	0.000	-0.532	0.400
19	11	0	0	2	0	0	0	0	5.961	4.322	5.254
20	27	1	0	2	1	1	0	0	4.317	4.158	5.090
21	16	2	0	2	2	2	1	1	1.792	1.377	2.309
22	5	0	1	2	1	2	0	1	3.401	4.006	4.938
23	23	1	1	2	2	0	1	0	4.174	4.371	5.302
24	26	2	1	2	0	1	0	0	1.386	2.047	2.979
25	3	0	2	2	2	1	1	0	4.382	3.616	4.548
26	20	1	2	2	0	2	0	1	1.792	1.951	2.883
27	4	2	2	2	1	0	0	0	0.000	1.354	2.886

표 5. 코드값을 사용한 orthogonal 행렬

x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	z ₁	z ₂	z ₃	z ₄	z ₅
1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	2	2	-2	1	1	-2	-2
-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	-1	2	-1	1	-2	1	-2	1
0	0	1	-1	1	-1	-1	-2	-2	1	1	1
-1	0	1	1	0	-1	2	1	-2	1	1	-2

1	-1	1	-1	0	-1	2	1	1	1	1	-2
0	-1	1	1	-1	-1	-1	-2	1	1	1	1
-1	-1	1	0	1	2	-1	1	1	1	-2	1
1	1	0	1	1	2	2	1	1	-2	1	1
0	1	0	0	0	-1	-1	-2	1	-2	-2	-2
-1	1	0	-1	-1	-1	-1	1	1	-2	1	1
1	0	0	0	-1	-1	-1	1	-2	-2	-2	1
0	0	0	-1	1	-1	2	-2	-2	-2	1	1
-1	0	0	-1	0	2	-1	1	-2	-2	1	-2
1	-1	0	-1	0	-1	-1	1	1	-2	1	-2
0	-1	0	1	-1	2	-1	-2	1	-2	1	1
-1	-1	0	0	1	-1	2	1	1	-2	-2	1
1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
0	1	-1	0	0	-1	-1	-2	1	1	-2	-2
-1	1	-1	-1	-1	2	2	1	1	1	1	1
1	0	-1	0	-1	-1	2	1	-2	1	-2	1
0	0	-1	-1	1	2	-1	-2	-2	1	1	1
-1	0	-1	1	0	-1	-1	1	-2	1	1	-2
1	-1	-1	-1	0	2	-1	1	1	1	1	-2
0	-1	-1	1	-1	-1	2	-2	1	1	1	1
-1	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1	1	-2	1

Result of summation over rows in each column

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

nificant level을 갖는 적합성을 보인다. 표4에는 각 시험에서의 예측된 침하량과 모델에서 예측된 침하량을 비교하였다.

4. 진동침하 영향요소 평가

그림 4는 진동의 크기 및 구속압에 따른 진

동침하량의 변화를 두 축차응력하에서 표현하였다. 실측치와 예측치의 비교를 위하여 실제 예측된 침하량을 포함시켰다. 그림4(a)에서 보여주듯 침하모델이 실측침하량을 잘 예측함을 알 수 있다. 진동침하는 진동의 크기와 구속압에 상당한 영향을 받으며 진동의 크기가 증가할 수록, 구속압이 감소할수록 진동침하가 증

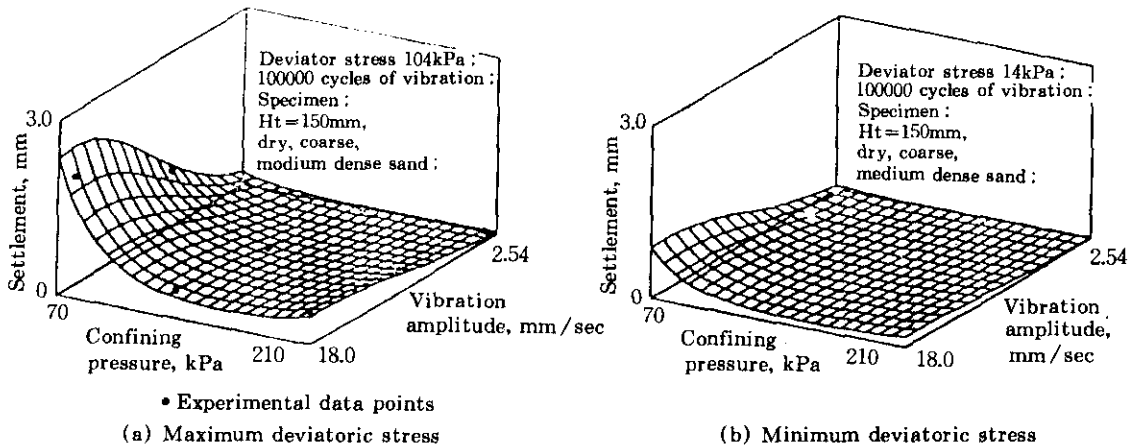


그림 4. 진동의 크기, 축차응력 및 구속압에 따른 진동 침하량의 변화

가함을 알 수 있다. 구속압의 크기가 70, 210 KPa인 지점에서 응답면(response surface)의 단면을 그림 5에 나타내었다. 주어진 진동크기에서 침하량은 구속압의 영향을 상당히 받는다. 그러므로 심층지반(thick soil layer)에서 얕은 깊이에 있는 지반의 상층부가 구속압이 큰 하층부보다 더 많은 진동침하를 유발시킨다.

현재 일반적인 진동기준으로 통용되고 있는 최대입자속도 50mm/sec보다 10배 정도 작은 진동범위에서도 상당한 진동침하가 유발됨을 주시하여야 한다. 예를 들면, 구속압의 크기가 70Kpa일 경우 진동의 입자속도 1.0cm/sec가 작용함에 따라 15cm 높이의 실내 공시체에서 1.5mm의 침하가 유발된다.(그림 5) 만약 현장 조건으로 직접 extrapolation이 가능하다면 10m 깊이의 지반의 경우 대략 10cm 정도의 진동침하가 예상되고 이로 인해 인접구조물에 상당한 손상을 입힐 수 있다.

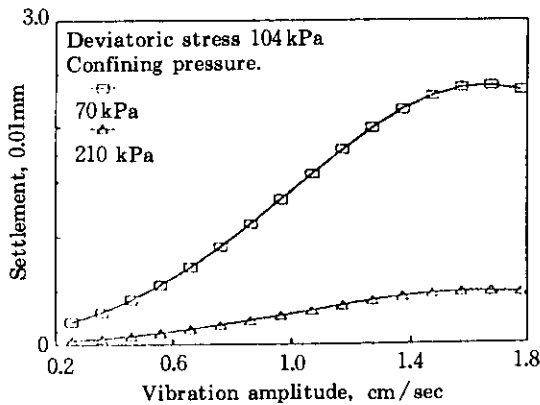
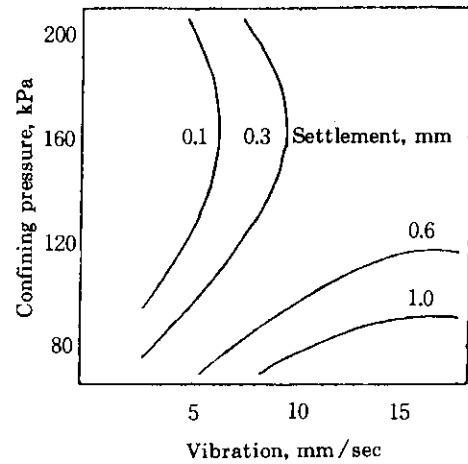


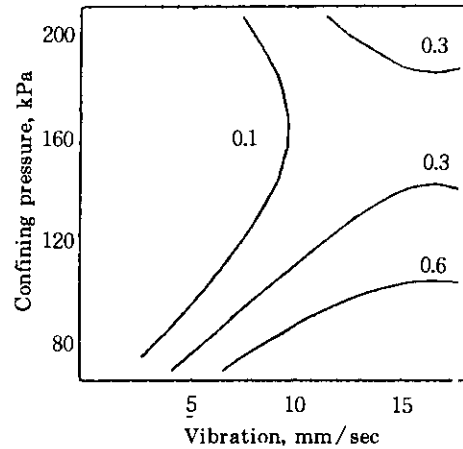
그림 5. 구속압의 크기 70kPa과 210kPa 에서의 진동침하와 진동 진폭관계

진동침하는 응력상태의 이방성(stress anisotropy)에 많은 영향을 받는다. 그림 4에 의하면 축차응력이 큰 경우, 축차응력이 작은 경우에 비해 상당히 많은 침하를 유발한다. 그림 4에 나타난 응답면을 각각의 침하레벨에 따라 절단하여 각 단면의 outline을 하나의 평면에 투영하면 그림6과 같은 침하 등고선(contour)

이 형성된다.



a) 축차응력=104 kPa



b) 축차응력=14 kPa

그림 6. 3차원 침하등고선 :

침하등고선을 이용하면 침하-진동크기-구속압의 3차원 관계를 2차원 도면에 나타낼 수 있다. 침하량이 0.1mm 이하의 지역은 침하가 일어나지 않은 지역으로 간주할 수 있는데 축차응력이 적은 경우에는 이 영역이 넓은 반면 큰 축차응력 하에서는 좁아짐을 알 수 있다. 다시 말하면 주어진 구속압에서 진동침하를 유발하는 한계진동의 크기가 응력 이방성이 커짐에 따라 줄어든다.

응력이방성의 영향을 살펴보기 위하여 주어진 구속압에서 축차응력을 증가시키며 진동침하를 계산하였다. 수평응력과 수직응력의 비인 토압계수는 대략 0.4에서 0.9 사이에서 변화하였다. 토압계수에 따른 침하량의 변화를 그림 7에 나타내었다. 토압계수가 정규압밀 사질토의 정지토압계수와 비슷한 0.45~0.6 영역에서 최대침하량이 유발됨을 알 수 있다. 도심지에서 흔히 볼 수 있는 인접 굴착공사의 경우, 굴착으로 인한 축방구속압의 감소와 응력 이방성의 증가로 인하여 정적인 침하는 물론 말뚝항타 등에 의한 진동침하를 크게 유발시킬 수 있으므로 시공상 상당한 주의를 요한다.

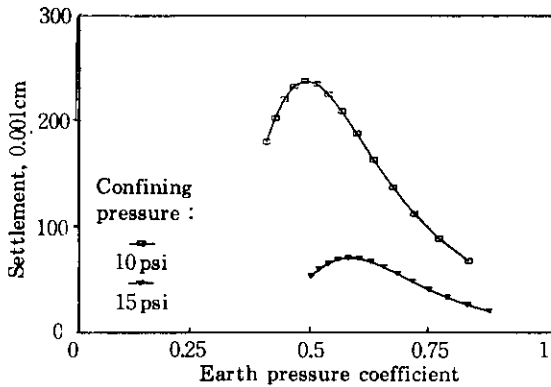


그림 7. 토압계수에 따른 침하량의 변화 (구속압 및 축차응력 이외의 변수들은 중간레벨임)

진동의 반복회수에 따라 진동침하는 증가한다. 그림 8에서와 같이 진동 회수의 영향은 초기진동에서는 큰 영향을 미치나 반복회수가 증가함에 따라 진동침하량이 줄어들며 안정화 된다. 그림 9는 입도분포에 따른 진동침하량의 변화를 나타내었다. 조립사질토의 경우 세립사질토보다 진동침하량이 크다. 이는 시료 성형시 초기 밀도에 차이에서 오는 영향으로 생각된다. 또한, 본 연구에서 사용된 사질토와 다른 입경의 크기 및 입도분포곡선을 갖는 사질토의 경우 진동침하에 상이한 영향을 미칠 가능성도 있다.

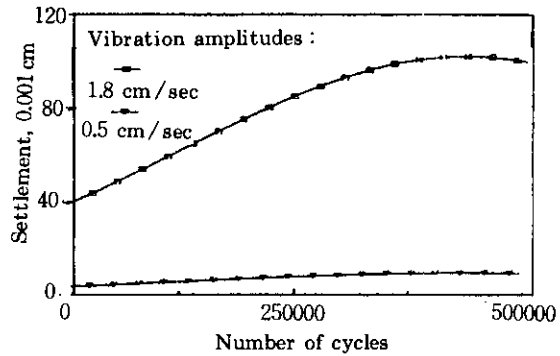
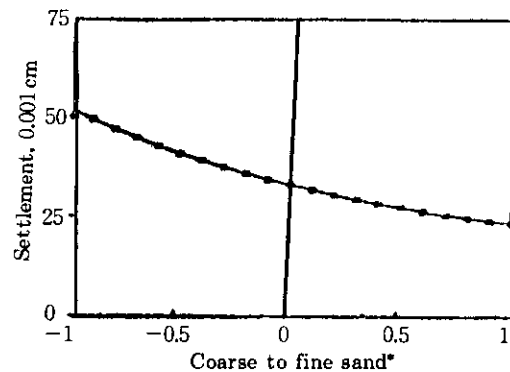


그림 8. 진동회수에 따른 침하량의 변화 (진동횟수 이외의 변수들은 중간레벨임)



*-1=coarse sand; 0=1:1 mixture of coarse and fine sand; 1=fine sand

그림 9. 입도분포에 따른 침하량의 변화 (입도분포 이외의 변수들은 중간레벨임)

실제 진동침하에측에서 상대밀도의 영향이 큰 기지의 사실이나 본 연구에서는 시료 상형시 상대밀도의 정밀한 조정의 어려움으로 상대밀도를 정성적 변수로 간주하였고 개발된 침하에측 모델에서는 이에 대한 영향이 크지 않았다. 개발된 모델식의 사용시 위 사항을 염두에 두어야 하며 사례 연구를 통한 예측침하량과 계측침하량의 비교연구에 의하면 연약 사질토 지반이 아니면서 진동침하의 영향을 받을 수 있는 상대밀도 30%~55%범위에서는 사용이 가능하다고 사료되며(김동수, 1996), 차후에 이에 대한 검증이 필요하다고 생각된다. 또한 본 연구에서 사용한 진동은 대부분 수직진동으로 수평진동성분에 관한 영향은 고려하지

못하였으므로 향후 이에 대한 연구도 필요하리라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 도심지 미소진동에 의한 진동침하의 중요성을 살펴보고 다변수 실험계획법을 이용하여 진동침하 예측모델을 개발하여 영향요소들을 고찰하였다. 본 연구로부터 얻은 주요 연구 성과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 미소지반진동에 의한 도심지 토건구조물의 피해는 진동과의 직접 전달에 의한 손상 보다는 지반 다짐으로 야기되는 부등침하에 의한 손상이 중요한 요소이다.
- 2) 미소진동에 의한 침하는 진동의 특성(진동원의 종류, 진폭, 진동 주파수, 진동 회수), 감쇠특성, 현장지반조건(응력상태, 상대밀도, 입도분포, 함수비와 배수조건) 등의 복합적 상호작용에 의해 발생한다.
- 3) 다변수 실험 계획법을 이용하여 진동침하 예측모델을 개발하였다. 이 방법은 실험량을 줄이며 요소들의 상호작용을 연구할 수 있다.
- 4) 영향요소 연구를 수행한 결과 진동의 크기, 구속압, 축차응력이 진동침하에 가장 큰 영향을 미쳤다.
- 5) 2.5~18mm/sec 범위의 미소 지반 진동에 의해서도 상당한 침하가 유발될 수 있음과 현장응력의 이방성이 침하의 중요한 요소임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 핵심기초(KOS-EF 951-1202-005-2) 프로그램의 일부 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수(1995), "미소 지반 진동이 도심지 토건

구조물 안전에 미치는 영향", 전문가 초청세미나, 경희대학교, pp.137~155.

2. 김동수, Drabkin, S., 이진선, "도심지 미소지반진동에 의한 주변침하 예측 기법-사례 연구를 중심으로", 한국 지반공학회지.(to be submitted).
3. 우제윤(1993), "우리나라 지반진동 규제기준의 제정 및 적용에 관한 제안(Ⅰ): 구조물", 한국 지반공학회 지반 진동위원회 학술발표집 2집, pp. 117~146.
4. Box, G.E.P., Hunter, J.S.(1978), "Statistics for Experimenters," *An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*", John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Box, G.E.P. and Draper, N.R.(1987), *Empirical Model-Building and Response Surface*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
6. Brodskii, V.Z.(1976), *Introduction to the Factorial Planning of Experiment*, in Russian, Science Publishing House, Moscow.
7. Brodskii, B.Z., Nabokov, A.B., and Rokhvarger, A.E.(1974), *Application of a 2-in. by 3-in. Orthogonal Factorial Design to the Investigation of the Deformation and Strength Characteristics of Mortars and Concretes*, Plenum Publishing Corporation, New York, pp. 1226~1230.
8. Dowding, C.H.(1991a), Vibration Effects of Pile Driving, *Proceedings, Thirty-Ninth Annual Geotechnical Engineering Conference, Continuing Education and Extension*, University of Minnesota, Minneapolis, MN.
9. Dowding, C. H.(1991b), Permanent Displacement and Pile Driving Vibrations, *Proceedings, Sixteenth Annual Members Conference of the Deep Foundations Institute*, J. F. Pavola, Ed., Sparta, NJ.
10. Edwards, A. T. and Northwood, T.D.(1960), "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures", *The Engineer*, Vol. 210, pp. 538~546.
11. Fisher, R.A.(1935) *The Design of Experiments*, 7th ed., (1960), Oliver & Boid, New York.
12. Kim, D.S. and Drabkin, S.(1993), "Investi-

- gation of Low-Level Vibrations and Their Induced Settlement in Urban Environment", *Proceedings, International Conference on Advances in Science and Technology*, Seoul, Korea, pp. 147~151.
13. Kim, D.S. and Drabkin, S., Laefer D., and Rokhvager, A.(1994), "Prediction of Low Level Vibration-induced Settlement, *Proceedings, the Conference Settlement '94 Texas*, pp.806~817.
 14. Kim, D.S. and Drabkin, S.(1994), "Investigation of Vibration Induced Settlement Using Multifactorial Experimental Design," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 18, No. 4, December pp.463~471.
 15. Lacy, H.S. and Gould J.P.(1985), Settlement from Pile Driving in Sands, *Proceedings, ASCE Symposium on Vibration Problems in Geotechnical Engineering*, pp. 152~173.
 16. Leathers, F.D.(1994), Deformations in Sand Layer During Pile Driving, *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Vol. 1, Proceedings of Settlement '94*, T.A. Yeung and G.Y. Felio, Eds., pp. 257~268.
 17. Linehan, P.W., Longinow, A., and Dowding, C.H.(1992), "Pipe Response to Pile Driving and Adjacent Excavation," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 118, No.2.
 18. Siskind, D.E. et al.(1980), *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting*. U.S. Bureau of Mines. Rep. Invest. No. 8507.
 19. Wiss, J.F.(1981). "Construction Vibrations : State-of-the-Art," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, GT2, pp.167~181.
 20. Woods, R.D. and Jedele L. P.(1985), Energy-Attenuation Relationships From Construction Vibrations, *ASCE Symposium on Vibration Problems in Geotechnical Eng.*, pp. 229~246.
 21. Yakovleva, E. D., Rokhvager, A.E., and Vlasov(1977), *Statistical Modeling of the Technology of Boron Nitride Fibers*, Plenum Publishing Corp., New York, pp 70~73.
 22. Youd, T. L.(1970), "Densification and Shear of Sand During Vibration", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.96, No. SM3.

(접수일자 1996. 2. 21)