

3방향 진동감지기의 제작 및 검증

Development and Calibration of 3-Component Vibration Transducer

김 동 수*¹
Kim, Dong-Soo
이 진 선*²
Lee, Jin-Sun
조 성 호*³
Joh, Sung-Ho

Abstract

Vibrations induced by traffic loading and construction activities are extremely important due to their potential to cause damage to adjacent structures and/or complaints to the neighbors. Vibration induced damage to the built environment may be caused by the direct transmission of vibrations as well as by the vibration induced differential settlement. In order to effectively control the vibration related problems, the accurate in-situ vibration monitoring is essential.

In this paper, a calibration technique of a geophone which is widely used in practice was described. Once the frequency characteristics of individual geophones were calibrated, the 3-component geophone was developed for the in-depth vibration measurement, and the detailed calibration and application techniques of the 3-component geophone were described. Vibrations caused by blasting, train loading, and pile driving were measured and the applicability of the 3-component geophone was assessed.

요 지

교통하중이나 건설 작업에 의해 야기되는 지반진동은 인접구조물에 손상을 입히거나 인근 주민들의 생활에 큰 불편을 야기할 수 있으므로 중요하게 측정, 관리되어야 한다. 지반진동으로 인해 발생하는 구조물의 손상은 진동의 직접 전파에 의한 구조물의 손상과 지반진동으로 야기된 지반의 부등 침하의 두 가지 원인으로 분류될 수 있다. 지반진동에 의한 피해를 효과적으로 줄이기 위해서는 현장에서의 정확한 진동의 측정이 필수적이다.

본 논문에서는 지반진동의 측정에 사용되어지는 대표적인 진동감지기인 속도계의 검증 방법에 대해 기술하였으며, 주파수대역 출력특성이 검증되어진 개개의 속도계로 부터 진동이 전파되

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

*2 정회원, 한국과학기술원 박사과정

*3 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 전임강사

는 매질인 지중에서 지반진동이 측정 가능한 3방향 진동 측정기를 제작하였고 진동측정기의 검증 및 운용법에 대하여 상세히 설명하였다. 또한 제작된 3방향 진동측정기로 열차진동, 말뚝항타진동 및 발파진동을 측정하여 적용성을 평가 하였다.

Keywords : Vibration, Geophone, 3-Component geophone, Calibration, Frequency response, In-depth vibration monitoring

1. 서론

최근 도심지에서 각종 토목, 건축 공사나 교통 하중으로 야기되는 지반진동으로 인하여 인접 구조물의 손상과 관련된 진동피해 민원이 다발하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 올바른 진동 계측 기술의 개발이 필수적이다. 그러나 국내에서는 진동 감지기의 주파수 특성 및 검증(calibration)기술, 신호처리 기술, 감지기와 지반간의 상호작용(coupling)의 영향 등 진동 계측에 중요한 영향을 미치는 요인들에 대한 충분한 이해 없이 형식적 계측만이 무분별하게 이루어져 진동 계측에 착오가 발생할 가능성이 많으며 장기적 진동 관리를 위한 데이터 베이스 형성에 어려움이 있다. 또한 대부분의 계측이 지상에서 이루어져 지중에서는 진동 측정이 불가능한 실정이다.

지반진동을 측정하기 위해서 사용되어지는 대표적인 장비로는 지반의 가속도를 측정하기 위한 가속도계(accelerometer), 속도를 측정하기 위한 속도계(geophone), 변위를 측정하기 위한 변위계(displacement transducer)가 있다. 변위 측정을 위하여는 고정 기준점(fixed reference point)이 필요하나 진동측정의 경우 고정 기준점 설정의 어려움으로 인하여 중력에 대하여 기준을 삼는 가속도계와 속도계가 사용되고 있다. 특히, 건설 및 교통하중에 의하여 유발되는 진동주파수 대역은 대략 10~100Hz 대역 이므로 이 영역에서 진동 측정이 용이한 속도계가 주로 사용되고 있다.

본 논문에서는 지반진동 측정을 위하여 광범위 하게 사용되어지는 속도계(geophone)의 주

파수 특성 및 검증방법에 대하여 기술하였으며, 개개의 검증되어진 속도계를 이용하여 지중에서 3차원 지반진동(연직방향, 종방향, 횡방향)을 계측하기 위한 3방향 진동감지기의 제작, 검증 및 운용 방법에 대하여 상세히 설명하였다. 또한 제작된 3방향 진동 감지기의 적용성을 평가하기 위하여 열차진동, 말뚝 항타진동, 발파진동 측정시험을 수행하였다.

2 속도계의 특성

2.1 속도계의 구조

속도계는 역학적 진동의 입자 속도를 전기적 출력(전압)으로 변환하기 위하여 그림 1-a)와 같이 코일에 둘러싸여진 영구자석으로 구성되며, 이 영구자석은 속도계의 케이싱에 용수철로 연결되어있다. 속도계는 역학적 진동에 의하여 발생하는 코일 혹은 영구자석의 움직임을 통하여 전기적 출력을 발생한다. 따라서 속도계는 그림 1-b)와 같이 강제 진동을 받는 1 자유도 시스템으로 모형화될 수 있다.

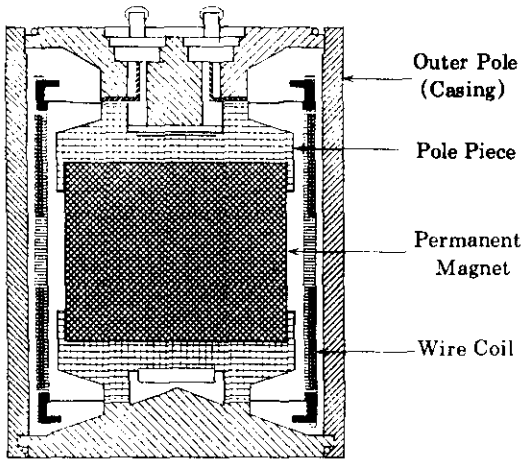
만약 속도계가 $u_x = u_0 \cdot \sin \omega t$ 의 진동을 받고 있다면 속도계의 변위와 속도계 내부 영구자석과의 상대변위는 다음과 같다.

$$\frac{\delta}{u_0} = \frac{(\omega / \omega_n)}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + [2\beta(\omega / \omega_n)^2]^2}} \quad (1)$$

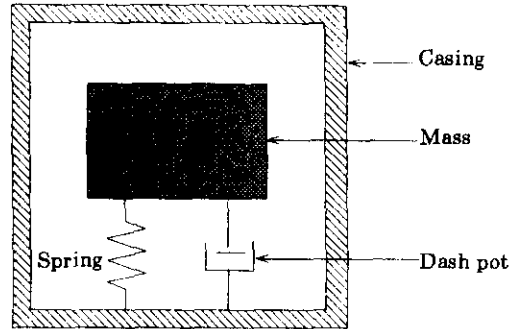
또한,

$$\tan \theta = \frac{2\beta(\omega / \omega_n)}{1 - (\omega / \omega_n)^2} \quad (2)$$

여기서, u_0 는 속도계의 최대변위, δ 는 상대변위, ω 는 진동의 각속도, ω_n 은 구조계의 고유 진



a) 속도계의 구조



b) 속도계의 1 자유도 모델

그림 1 속도계의 구조

동수이다. β 는 구조계의 감쇠상수, θ 는 속도계의 변위와 내부자석의 변위사이의 위상차이다. 따라서 속도계는 주파수에 따른 응답 특성과 위상 차이를 가지게 되며, 이에 대한 검증이 필요하다.

2.2 속도계 작동성능과 관련된 영향요소

진동 변환기(vibration transducer)는 역학적 운동을 전기적 신호로 전환해야 하기 때문에 일반적으로 속도계의 몸체 내에 매우 약하게 연결되어 있다. 그러나 전기적 신호를 전달하는 속도계의 다른 구성요소들은 역학적 변위에 제한을 받지 않는다. 진동변환기의 작동 성능에 영향을 주는 주된 요소들은 다음과 같다.

민감도(sensitivity): 속도계의 민감도는 진동의 입자 속도에 대한 전기적 출력비를 말한다. 또한 속도계는 진동축 직각 방향에 대한 출력은 가능한 한 최소이어야 한다.

해상도(resolution): 해상도는 기록 가능한 전기적 출력의 변화를 얻기 위한 최소한의 역학적 입력치를 말한다.

주파수대역 응답(frequency response): 주파수대역 응답이란 역학적 진동을 받는 속도계의 진동 주파수에 따른 출력치를 나타낸다.

위상차(phase shift): 위상차란 역학적 진동의 입력과 전기적 출력의 시간차를 말하며 가능한 한 최소의 값을 가져야 한다.

주위환경에 대한 민감도(environmental sensitivity): 습기, 온도, 음향 노이즈, 자기장 변화에 따른 진동감지기의 응답 특성을 말한다.

크기와 질량(volume and mass): 저주파수에서도 작동할 수 있는 진동감지기일 수록 크기와 질량이 커지며 설치가 힘들고, 전체적인 진동 시스템에 변화를 줄 수 있다.

2.3 진동감지기의 설치

현장에서 진동감지기의 설치하는 매우 중요한 사항이다. 최대 입자 가속도 0.3g이하에서는 진동감지기의 진동축 직각 방향으로의 흔들림(rocking motion)은 무시할 수 있을 정도이며, 따라서 별도의 장착 장치 없이도 표면에 설치 가능하다. 그러나 최대 입자 가속도 0.3g이상의 진동을 받는 경우에는 진동을 측정하고자 하는 표면이 지반일 경우 진동감지기를 완전히 묻거나 모래주머니 등을 올려 놓는 방법으로 지반과 진동감지기간의 상호작용(coupling)을 좋게 하여야 한다(Johnson, 1962). 또한 측정하고자 하는 방향(수직, 수평)으로 수직성(혹은 수평

성)을 정확히 맞추어 설치하여야 올바른 계측 값을 얻을 수 있다.

3. 속도계의 검증

국내의 진동기준이 대부분 최대입자속도를 기준으로 작성되어 있으므로 진동계측에 주로 사용되는 진동계측 장비는 속도계이다. 그러나 속도계는 종류에 따라 적용가능한 주파수대역이 다르므로 적용 주파수 대역내에 존재하는 진동의 계측에 사용되어야만 하며, 계측에 사용되어지는 개개의 속도계가 어떠한 주파수대역 응답특성을 가지고 있는지를 살펴보는 일 또한 매우 중요한 일이다. 또한 공장에서 제작되어져 나온 개개의 속도계가 제공되어지는 대표적인 검증곡선을 만족하는지를 살펴 보아야 하며, 시간에 따른 속도계 내부 영구자석의 성능감소를 고려하여야 하므로 개개의 속도계에 대한 주기적 검증이 필요하다.

속도계의 주파수별 응답특성에 대한 검증을 하기 위해서는 신호 발생기(function generator), 진동대(electric shaker), 속도계, 기준

진동계(reference vibration transducer), 신호 분석기(waveform analyzer)가 필요하다. 본 실험에서는 기준 진동계로써 Brüel & Kjaer사

표 1. 검증에 사용된 속도계의 제원

a) 속도계의 제원(Mark Product L-15B)

	L-15B
Standard frequency(Hz)	4.5~100
Frequency tolerance	±0.5Hz
Standard coil resistance(Ohms)	150 240 380
Maximum distorsion @0.7in/sec@12	0.2%
Transduction constant (V/in/sec±10%)	0.047 √R.
Open circuit damping(±10%)	1.253/f
Coil current damping	11.84R./f(R.+R.))
Suspended mass(Grams)	23.00
Power sensitivity(mW/in/sec)	2.21
Case-to-coil motion(in. p-p)	0.080
Basic unit diameter(in.)	1.25
Basic unit height(in.)	1.4
Basic unit weight(in.)	5.0

b) 기준진동계의 제원(Brüel & Kjaer Accelerometer Type 8318)

Reference sensitivity(At 159.2Hz($\omega=1000s^{-1}$), 100ms ⁻¹ and 23°C)	311 $\mu A/ms^{-2}$
Maximum vibration(Peak)	15ms ⁻²
Noise(2Hz-1kHz)	0.04mms ⁻² (RMS)
Lower limit frequency(-5%)	0.1Hz
Typical transverse resonance frequency	1.6kHz
Output impedance	18k Ω
Power	+ 15V(8mA) DC
Temperature Range	-50 to + 85°C
Max. shock acceleration	1000ms ⁻²
Typical acoustic sensitivity(At 154dB, SPL(2-100Hz)	0.001ms ⁻²
Typical base strain sensitivity(At 250 $\mu\epsilon$ in base plane)	0.0003ms ⁻² / $\mu\epsilon$
Typical temperature transient sensitivity(3Hz LLF)	0.0001ms ⁻² /°C
Weight	470gram
Sensing element	Piezoelectric material PZ23
Maximum transverse sensitivity(At 30Hz, 100ms ⁻¹),	14%

의 8318 가속도계, 진동대로써 Brüel & Kjær 사의 Type 4804 가진기(Excitor), 신호 발생기는 Hewlett Packard사의 33120A 신호발생기, 신호 증폭기로는 Brüel & Kjær사의 2712 증폭기, 신호 분석기로는 Hewlett Packard사의 35665A 신호분석기를 사용하여 Mark Product 사의 4.5Hz 속도계(Model L-15B)를 검증하였다. 속도계의 검증에 기준으로 사용되어진 가속도계는 주파수 대역 0.1Hz~1kHz까지의 범위내에서는 평탄한 출력치를 나타낸다. 검증에 사용된 속도계 및 기준진동계의 제원을 표1에 나타내었다.

검증 장비의 구성은 그림 2와 같으며, 특수 제작된 연결 장치(그림 3)를 사용하여 가속도계와 속도계의 움직임이 같도록 진동대에 부착하였다. 또한 진동대로 부터 발생하는 전기장의 차단을 위해 위의 연결 장치는 알루미늄 재질로 제작하여야 한다. 수평방향 속도계(Horizontal Geophone)의 경우 그림 2의 검증장비

구성에서 진동대를 회전시켜 수평방향으로 설치하여 위에서 설명한 바와 같은 방법으로 검증을 실시하였다.

속도계의 주파수 응답특성을 검증하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

신호발생기를 이용하여 정현파를 발생시키고 전기신호를 증폭기를 이용하여 증폭시킨 후 진동대에 입력하여 식(3)과 같이 역학적 진동을 발생시켰다.

$$u_{shaker} = u_0 \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

신호발생기로 부터 발생하는 정현파의 주파수 대역(f)을 1Hz부터 1kHz까지 변화를 시키면서 식(3)의 진동을 받는 속도계의 출력치와 기준 가속도계의 출력치를 각각 식(4), 식(5)와 같이 얻었다.

$$V_{velocity} = u_0(2\pi f) \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

$$A_{acceleration} = u_0(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

주어진 주파수에서 속도계와 가속도계의 출력의 절대값과 기준 가속도계의 검증 계수를

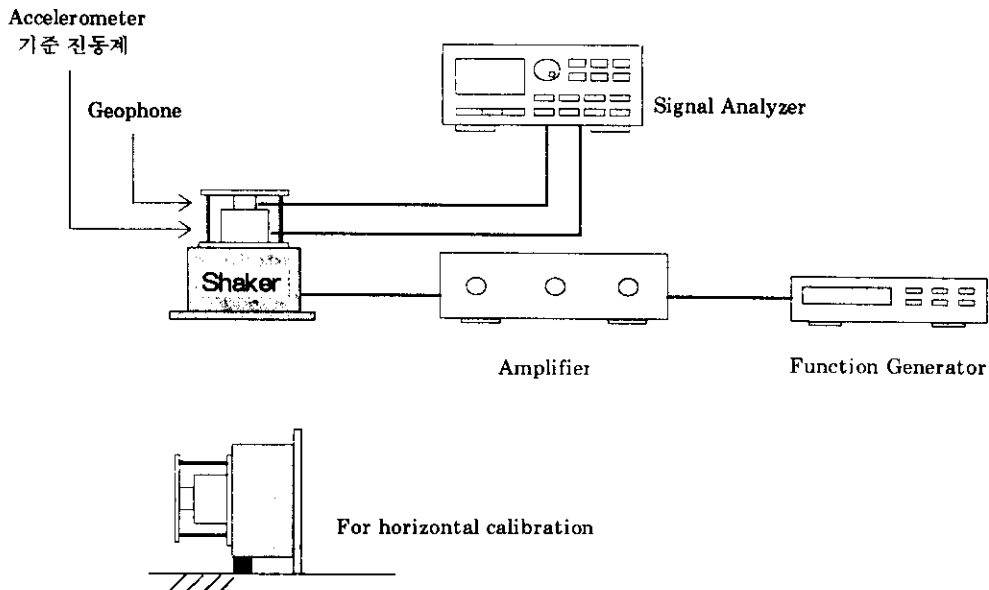


그림 2 속도계 검증 시스템의 개요도

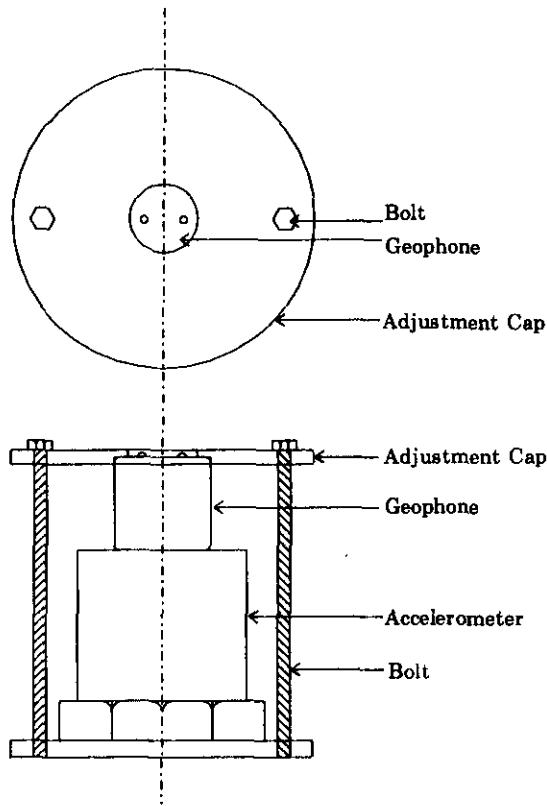


그림 3 연결장치 상세도

이용하여 식 (6)과 같이 속도계의 검증 계수를 구하고, 검증을 실시한 전 주파수 대역에 표시하면 속도계의 주파수별 응답특성을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{검증계수}(F) &= \frac{V_{\text{velocity}}}{A_{\text{acceleration}}(2\pi f)} \\
 &= \frac{u_0(2\pi f) \cos(2\pi ft)}{\frac{u_0(2\pi f)^2 \sin(2\pi f)}{\alpha}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서, F : 검증에 사용되어진 속도계의 검증 계수

(V/(in/sec))

α : 기준 가속도계의 검증 계수

(in/sec²)

진동 주파수 4.5Hz에서의 가속도계와 속도계의 신호를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 신

호로부터 속도계의 신호는 가속도계의 신호와 $2\pi f$ 의 진폭차이와 90° 의 위상차 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 진동대의 주파수대역을 변화시키며 시간영역에서 속도계와 가속도계의 위상차이를 계산해보면 그림 5-a)와 같다. 공진 주파수 4.5Hz에서 90° 의 위상차이가 나는 것을 알 수 있으며, 100Hz 이상의 주파수 대역에서는 위상특성의 상관성이 떨어짐을 알 수 있다.

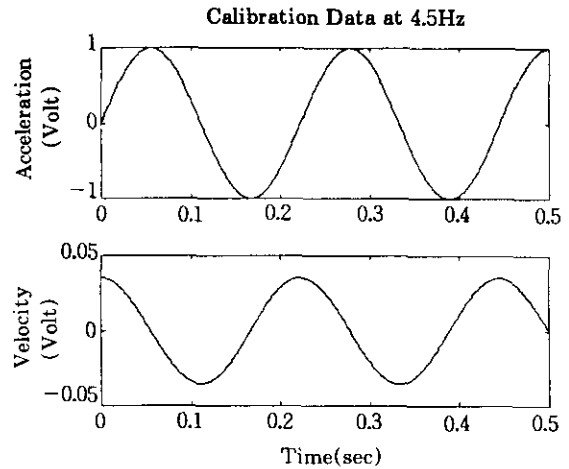
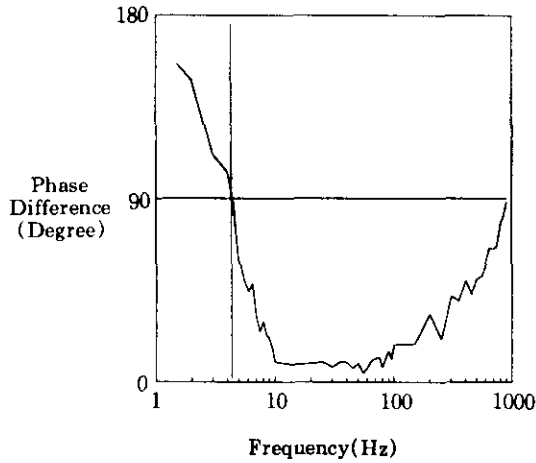


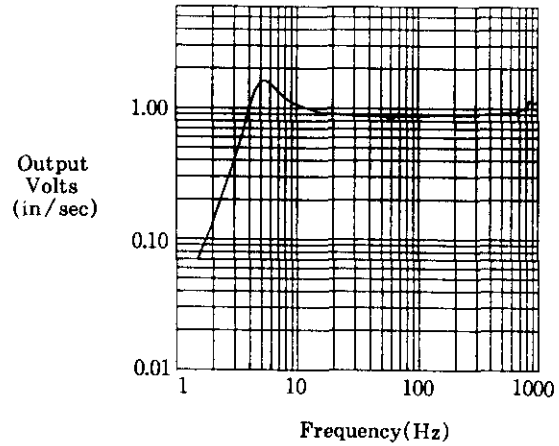
그림 4 진동주파수 4.5Hz에서의 가속도계와 시간 영역 출력 곡선

그림 5-b)에 검증을 한 속도계의 전형적인 주파수 대역 응답특성이 도시되어 있다. 공진 주파수 4.5Hz에서 가장 큰 출력치를 발생하며, 주파수 대역 10~600Hz에서 일정한 출력치를 발생함을 알 수 있다. 또한 60Hz부근에서의 응답특성의 변화는 교류 전원으로부터 발생하는 것으로 사료된다.

따라서, 검증을 한 속도계의 경우 주파수에 따라 일정한 출력 전압을 발생시켜주는 진동 주파수 10~600Hz에서 사용해야 함을 알 수 있으며, 표면파시험(SASW)에서와 같이 측정된 신호의 위상정보를 사용하는 경우 속도계의 위상특성이 일정한 진동 주파수 10~100Hz에서 사용해야 하며, 여러개의 속도계를 검증하여 위상특성이 비슷한 속도계를 조합하여 시험하여야 한다.



a) 4.5Hz 속도계의 주파수대역 위상차



b) 4.5Hz 속도계의 주파수대역 진폭특성

그림 5 4.5Hz 속도계의 주파수대역 위상차 및 응답특성

4. 3방향 진동측정기의 제작 및 검증

지반진동은 지반을 매질로 전파되면서 지반 내에서 3차원 운동을 하게 된다. 진동원의 종류 및 전파매질의 성질에 따라 지반진동의 특성이 변화하므로 지반진동의 입자운동을 파악하기 위해서는 공간내 수직 좌표계인 X, Y, Z 3방향에 대해 각각 진동의 입자 속도에 대한 측정이 이루어져야 한다. 또한 지표면 진동만이 아니라 지중 진동 측정을 위해서는 3방향 진동측정기가 지반내에 설치된 시추공에서 측정되어야 한다. 이때 시추공과 측정기사이의 Coupling이 중요하고 지중에서 정확한 계측방향(orientation)으로 설치되어야 한다.

4.1 3방향 진동측정기의 제작

3방향 진동측정기를 제작하기 위해서는 개의 검증되어진 3개의 속도계(수직방향(vertical direction), 횡방향(transverse direction), 종방향(longitudinal direction))가 필요하다. 3방향 진동측정시스템의 개요도는 그림 6과 같으며, 시추공내에서 에어패드(air

pad)를 통하여 단단히 고정되어 지중 진동을 측정할 수 있도록 제작되었다(그림 7). 제작시 필요한 사항은 다음과 같다.

몸체(casing): 주변 자기장의 영향을 방지하고, 지하수위 밑에서도 진동의 측정이 이루어져야 하므로 부식방지를 위해 알루미늄 케이스를 사용한다.

성형(mold): 지하수위 하에서 측정시 수압에 의한 물의 침투를 막고 3방향 진동 측정기의 몸체와 개개의 속도계의 밀착을 위하여 에폭시 수지를 이용하여 3방향 진동 측정기 내부를 성형하여야 한다.

전선(cable): 3방향 진동측정기의 전선은 주변 자기장에 의한 잡음(noise)을 방지하기 위해 접지선과 2개의 전선이 포함된 실드된 전선(two-conductor shielded cable) 3개가 필요하며, 이 3개의 전선은 알루미늄 호일로 실드된 하나의 피복으로 둘러싸이게 된다(그림 8). 개개의 전선은 3방향 진동측정기 내부의 개개의 속도계에 극성을 맞추어 각각 연결되며, 각각의 접지선은 한선으로 모아서 신호분석기의 접지단자 또는 철제 케이스에 부착하여 전기선 내부의 잡음을 제거한다.

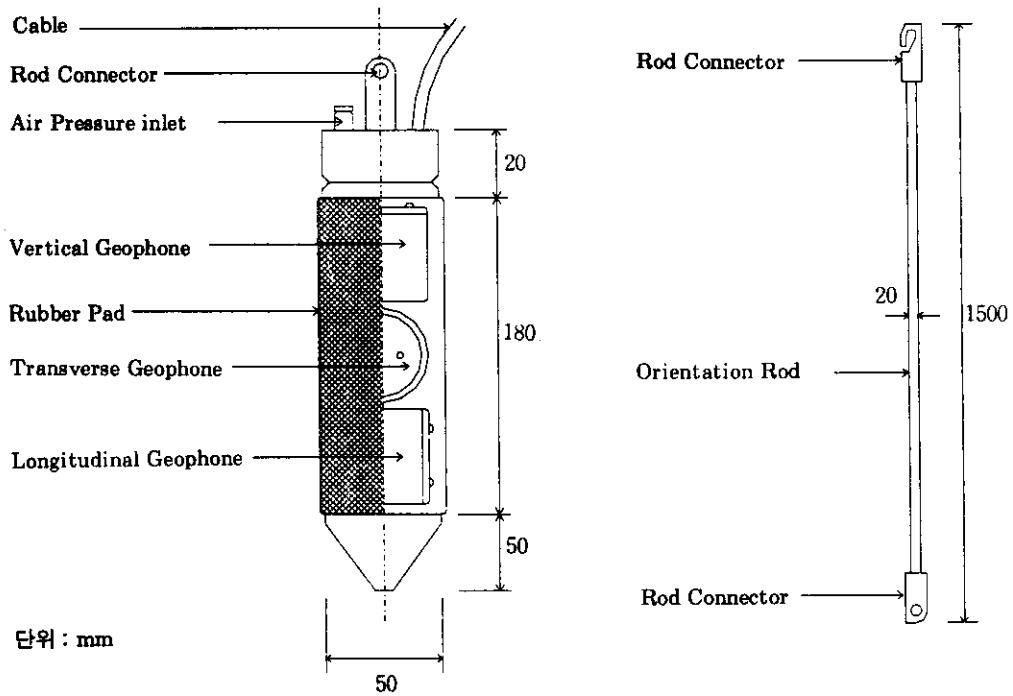


그림 6 3방향 진동 측정기의 개요도

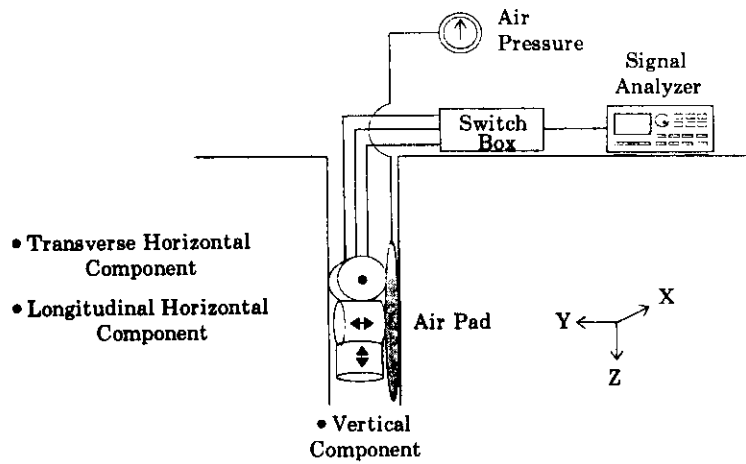


그림 7 3방향 진동 측정기의 운용

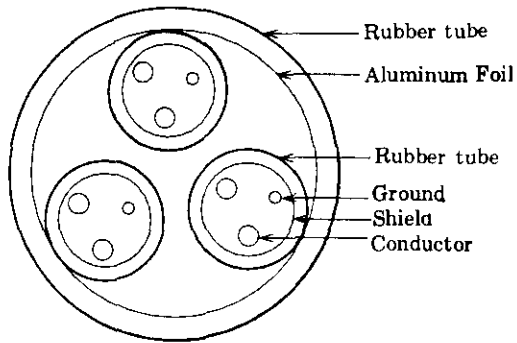


그림 8 3방향 진동 측정기 제작에 사용된 전선의 단면

방향성(orientation): 3방향 진동측정기가 지중에서 올바른 방향으로 설치되기 위해 지상에서도 설치방향을 알 수 있도록 방향이 표시된 orientation rod가 필요하며 부식과 무게를 줄이기 위해 알루미늄으로 제작하였다. orientation rod의 길이는 약 150cm이며, 무게는 300g 정도이다(그림 6).

에어패드(air pad): 시추공내에 3방향 진동 측정기를 밀착 시키기 위하여 고무 튜브로 만들어진 에어패드로 3방향 진동측정기를 시추

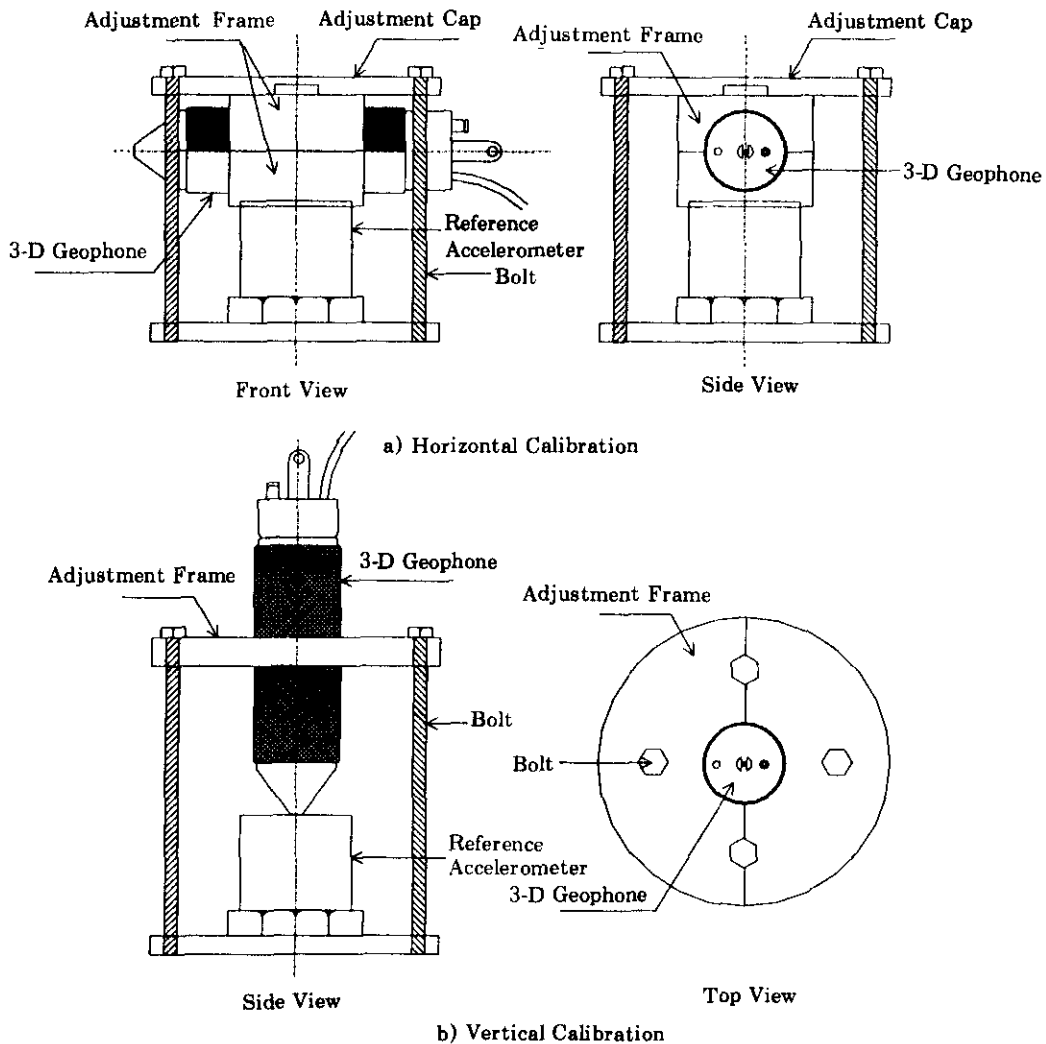


그림 9 3방향 진동 측정기의 검증을 위한 연결장치 상세도

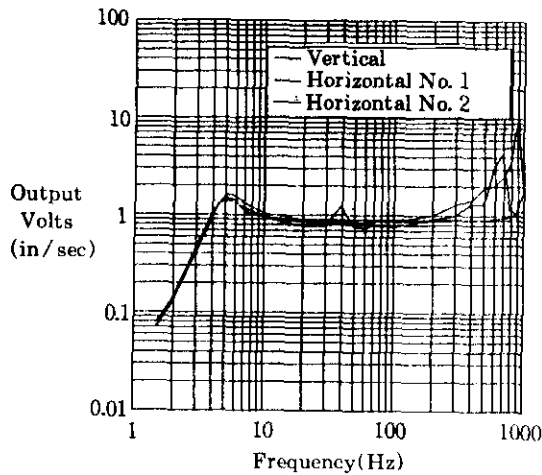


그림 10 3방향 진동 측정기의 주파수별 진폭 특성

공에 밀착 시킨다. 이때 공기압은 지하수압을 견딜 수 있을 정도로 충분히 커야하며, NX 크기의 케이싱(내경 76mm)에 밀착 가능하게 제작되었다. 또한 에어패드에 작용되는 공기압은 지상에서 압력 호스를 통하여 3방향 진동 측정기로 전달된다.

4.2 3방향 진동 측정기의 검증

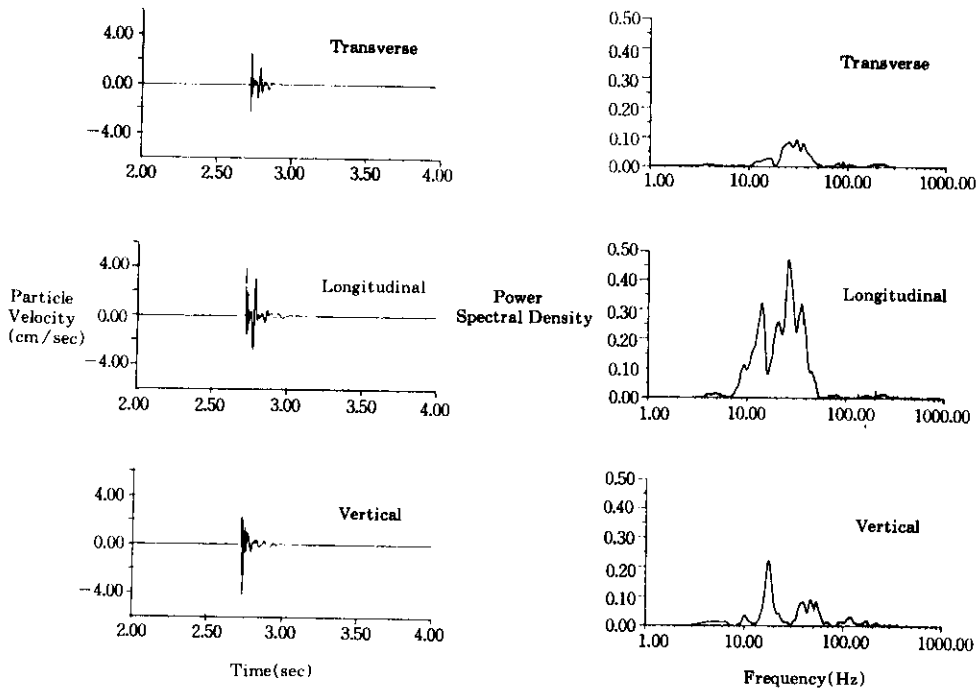
개개의 검증되어진 속도계를 이용하여 3방향 진동 측정기를 제작시, 성형 과정의 결함 또는 전체 구조시스템의 제원의 변화에 의해 주파수별 응답 특성의 변화가 있을 수 있다. 제작된 3방향 진동 측정기 역시 3장에서 설명한 방법으로 주파수대역 응답 특성을 검증하였다. 이를 위하여 가속도계와 3방향 진동 측정기를 진동대에 강결시킬 수 있는 연결장치를 제작하였다(그림 9). 검증 결과는 그림 10과 같으며, 개별적으로 검증되어진 속도계에 비하여 고주파 영역(200Hz 이상)에서의 응답 특성이 일정한 값을 나타내지 못함을 알 수 있다. 따라서 제작되어진 3방향 진동 측정기는 일정한 진폭 전압을 나타내는 10~200Hz의 주파수 대역에 존재하는 진동의 측정에 사용되어야 함을 알 수 있다.

5. 3방향 진동 측정기의 운용

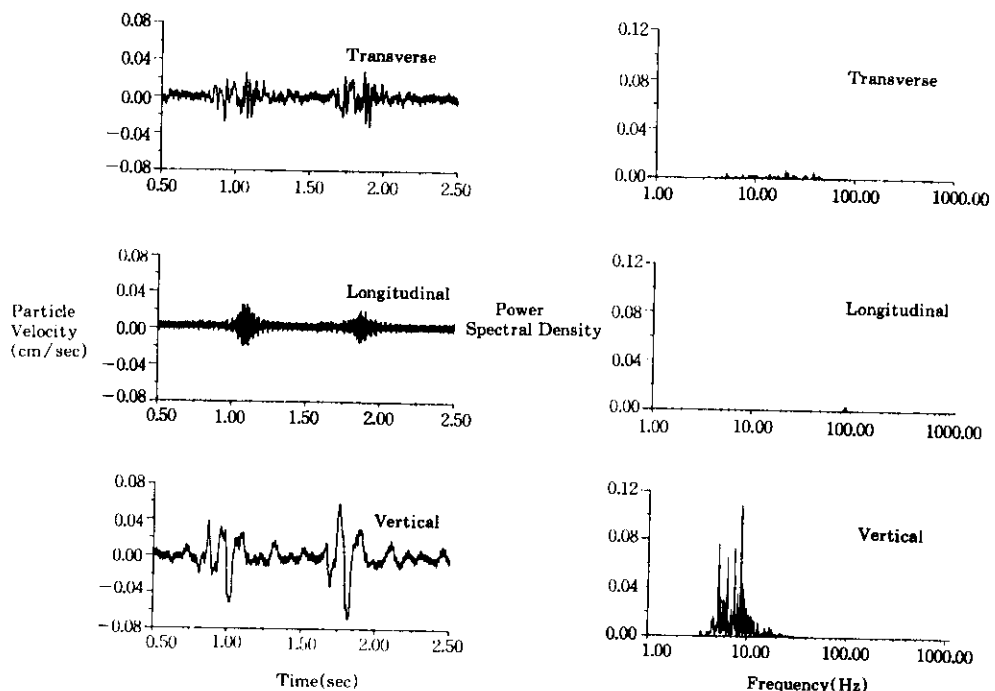
앞절에서 기술된 방법으로 제작되어진 3방향 진동 측정기를 이용하여 지중 시추공 내에서 실제 지반 진동(발파, 말뚝, 열차진동)을 측정하였다. 발파진동의 계측은 대전 시내 고속철도 건설을 위한 터널 발파 시험 시공 지역에서 계측되었으며, 풍화토층이 대략 12m의 깊이로 암반위에 위치하였다. 발파는 2kg의 다이내마이트로 암반내에서 발파가 이루어졌으며 측정 깊이 및 진동원으로부터 계측지점까지의 수평이격거리는 각각 지표면하 7.5m 와 9.6m였다. 말뚝 항타진동의 계측은 부산 영도에서 광안대로 건설을 위한 교각 기초 시험 시공 지역에서 계측되었으며, 마찰지지 강관 말뚝이 약 40m 깊이까지 항타되었다. 계측 깊이 및 진동원으로부터 계측지점까지의 수평이격거리는 각각 지표면하 6m와 38m였다. 마지막으로 열차진동의 경우 경부선 병점역 인근 지역에서 110km/hr의 통과속도로 지나는 객차수 9량의 상행선 무궁화 열차에 대한 계측이 이루어졌으며, 계측 깊이 및 진동원으로부터 계측지점까지의 수평이격거리는 각각 지표면하 30cm 와 27m였다. 각각의 진동에 대한 시간이력 곡선 및 주파수 영역 분석을 통한 진동의 탁월 주파수를 살펴 보았다(그림 11). 대체적으로 지반진동의 주요 에너지는 수직방향 성분이 가장 많은 에너지를 포함하고 있었으며, 특히 말뚝항타진동과 열차진동의 경우 종방향 진동 에너지 성분은 극히 미미함을 알 수 있다. 또한 대부분의 진동 에너지가 10~100Hz의 주파수대역에 분포함을 주파수 영역 분석으로 알 수 있었다.

계측되어진 3방향 진동 측정기 기록을 이용하여 그림 12와 같이 측정 결과를 2차원 평면상 도시하면, 진동이 전파되는 지반의 입자운동 상태 또한 쉽게 알 수 있다.

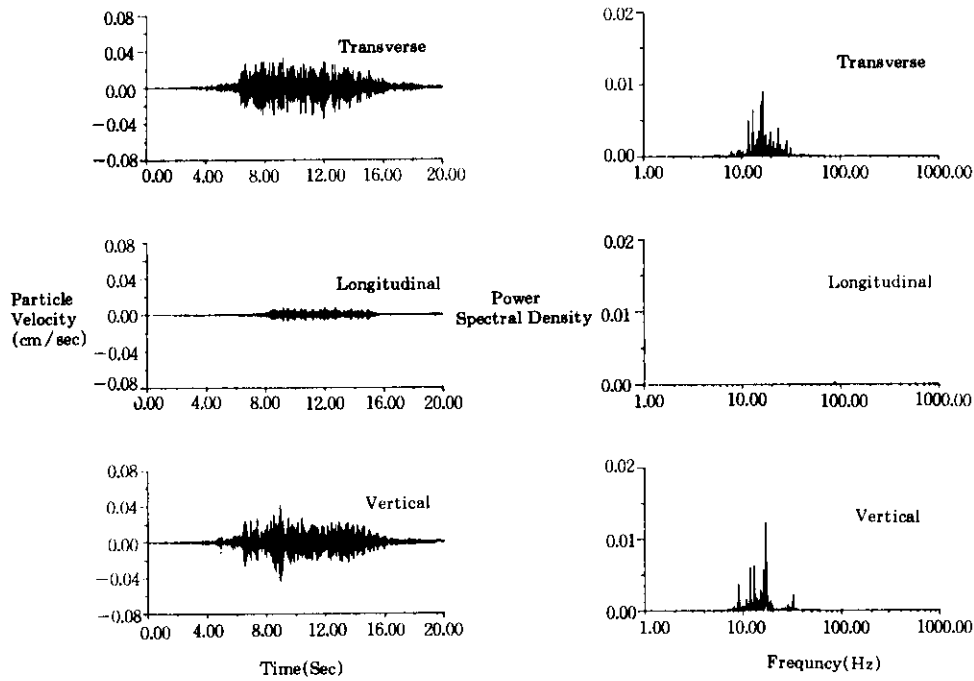
발파진동의 경우 2차원 평면상에 지반의 입자운동을 표시하여 초기 압축파의 도달과 그 이후 공진으로 인한 지층의 수직방향 운동을 구분할 수 있다(그림 12-a)). 말뚝 항타 진동의 경우 항타되어진 말뚝이 마찰지지 말뚝이므로



a) 발파진동의 시간이력곡선 및 주파수 영역 특성



b) 말뚝항타 진동의 시간이력곡선 및 주파수 영역 특성

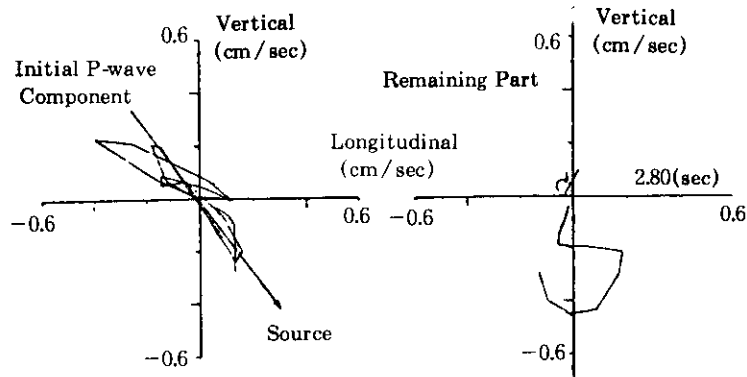


c) 열차진동의 시간이력곡선 및 주파수 영역 특성

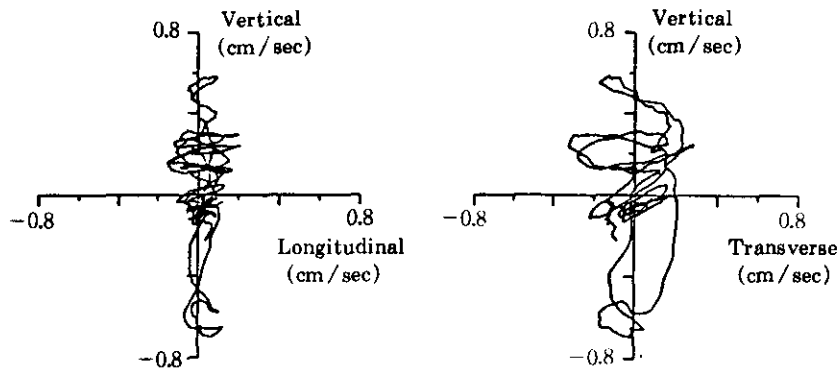
그림 11 3방향 진동측정기로 계측된 여러 지반진동의 시간 이력 곡선 및 탁월주파수 대역

로 주된 지반의 운동이 SV임을 알 수 있으며 (그림 12-b)), 열차진동의 경우 열차 주행방향에 직각인 방향에 대해서는 SV파가 주된 성분으로 전파가 이루어지며, 반면에 열차 진행

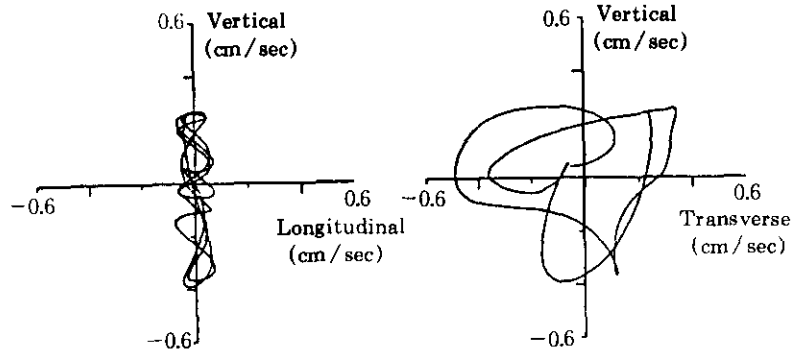
방향과 나란한 방향(transverse direction)으로는 반시계 방향으로 타원운동을 하는 표면파(Rayleigh wave)가 주된 성분으로 전파가 이루어짐을 알 수 있다(그림 12-c)).



a) 발파진동으로 야기된 지반의 입자운동



b) 말뚝향타 진동으로 야기된 지반의 입자운동



c) 열차진동으로 야기된 지반의 입자운동

그림 12 진동의 전파를 겪는 지반의 입자운동

6. 결 론

본 논문에서는 지중 및 지표면에서 정확한 지반 진동의 계측을 위한 진동 감지기의 제작 및 검증 방법을 제시하였다. 본 연구로부터 얻어진 주요 성과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 최근 건설진동 측정에 주로 사용되는 속도계의 주파수대역 응답특성 검증기법을 정립하여 개개의 속도계에 대한 신뢰성있는 측정 주파수 대역을 검증하였다.
2. 주파수 대역 출력 특성이 검증되어진 개개

의 속도계를 이용하여 지중에서 3방향 지반 진동이 측정 가능한 3방향 진동 측정기를 제작 및 검증하였다.

3. 제작되어진 3방향 진동 측정기를 이용하여 열차, 발파 및 말뚝 향타진동을 계측하였으며 이를 이용하여 진동원별 탁월 주파수 특성과 지반의 입자운동 특성을 살펴보았다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학재단의 핵심기초(KOS-EF 951-1202-005-2) 및 특정기초(KOSEF

95-0600-01-01-3)프로그램의 일부 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드리며, 3방향 진동 측정기 제작에 많은 조언을 해주신 경희대학교 토목공학과 목영진 교수님과 제작에 도움을 주신 삼보컨트롤의 이종일 사장님께도 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이진선. (1997) "진동원에 따른 지반진동의 감쇠 특성", 한국과학기술원 석사학위논문.
2. Das, B.(1993), "Principles of Soil Dynamics," PWS-KENT, pp.301-325.
3. Dowding, C.(1996), "Construction Vibration," Prentice Hall.
4. Johnson, C.F. (1962), "Coupling Small Vibration Gauges to Soil," Earthquake Notes, Eastern Section, Seismological Society of America, Vol. 33, No. 3, pp. 40~47.
5. Lam, Y.(1989), "Laboratory Evaluation of Geophone Performance at High Frequencies," MSCE Paper, Univ. of Texas at Austin.
6. Rechart, F.E., Woods, R.D., Hall, J.R., (1970), "Vibrations of Soils and Foundations," Prentice-Hall. pp 263-300.

(접수일자 1997. 4. 15)