

암석 시편의 충격반향(공진주) 시험에 관한 고찰

조정우^{1)*}, 임보성²⁾, 조호범²⁾, 전석원³⁾, 하희상⁴⁾

Investigation on Impact-echo Testing Method for Rock Specimens

Jung-woo Cho, Bo-sung Lim, Ho-bum Cho, Seokwon Jeon and Hee-sang Ha

Abstract Impact-echo test is a non-destructive testing method to determine dynamic properties of a material. This presentation introduces the experimental set-up and procedure of the test for rock specimens. In addition, the test results of domestic rocks collected in 5 different areas, a cement mortar and aluminium alloy are presented. The test results include resonance frequencies of P- and S-wave as well as damping ratios of the described 7 different materials. The differences between dynamic and static values of elastic moduli are about 10%, while the dynamic Poisson's ratios are greater than the static Poisson's ratios by at least 0.07. The damping ratio is dependent on the joint density and degree of weathering of a rock specimen.

Key words Impact-echo method, Rock specimens, Dynamic physical properties, Resonance frequency, Damping ratio

초 록 충격반향기법은 특정 매질에 충격을 가하여 매질의 동적 물성을 측정할 수 있는 비파괴 시험법이다. 본 연구에서는 암석시편에 충격반향기법을 수행할 수 있는 시험장비를 설치하고, 동적 물성치를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이를 통해 국내 5개 지역에서 채취한 암석 시료 및 시멘트 모르타르와 알루미늄 합금에 대해 시험을 수행하여 동적 물성치를 측정하고, 1회의 충격시험으로 종파 및 횡파의 공진주파수와 감쇠비를 결정하였다. 그 결과, 동탄성계수와 정탄성계수는 10 %내외의 차이를 가진 결과치가 도출되었고, 동포아송비는 정포아송비에 비해 0.07 이상 높은 값이 측정되었다. 또한 풍화도가 높거나 절리가 발달한 암석일수록 감쇠비가 증가하는 현상을 관찰하였다.

핵심어 충격반향기법, 암석 시편, 동적 물성치, 공진주파수, 감쇠비

1. 서 론

충격반향시험법(impact-echo method)은 1983년에 미국의 표준기술연구원(National Institute of Standards and Technology)이 제안한 비파괴 조사 기법으로 특정 매질 내의 공극의 위치나 균열의 크기 및 매질의 두께 등의 탐사가 가능한 기법이다(ASTM, 2003). 최근에는 주로 터널 내 콘크리트 라이닝의 건전도 검사(조비라 등, 2000), 보강철근의 판별 및 콘크리트 구조물 내의 균열 조사 등에 많이 이용되고 있고, 이에 관련된 암석

역학적 연구도 이루어진 바 있다(신종진과 전석원, 2000).

일반적으로 충격해머 혹은 압전기를 이용하여 매질 표면에 물리적인 충격을 가한 후 이로 인해 발생한 응력파(P파, S파 등)를 수신하여 대상 매질을 해석하는 것이 이 시험법의 기본적인 메커니즘이다. 우선 응력파가 매질 내부에서 전파되는 이동시간을 측정하여 P파와 S파의 속도를 얻을 수 있는데, 이 속도로부터 동탄성계수, 동포아송비, 동전단변형계수를 계산할 수 있다. 또한 프리에 변환을 통해 주파수 영역을 확인하면 내진설계에 사용되는 감쇠비(damping ratio)를 구할 수 있는 장점이 있다. 이 감쇠비의 역수를 취하면 비탄성 감쇠지수(seismic quality factor) Q를 구할 수 있다. Q값을 이용하면 감쇠지수를 입력변수로 사용하는 상용전산해석 프로그램(예: ITASCA사의 개별요소 프로그램인 PFC)에서 사용되는 주파수에 무관한 감쇠지수(damping ratio) α 와 점성 감쇠지수(viscous damping ratio) β 를 산정할 수 있다.

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정

²⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

³⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 부교수

⁴⁾ 지오맥스(주) 대표이사

* 교신저자 : cho79@snu.ac.kr

접수일 : 2007년 4월 4일

심사 완료일 : 2007년 4월 12일

본 연구에서는 암석 시료에 충격반향기법을 수행할 수 있는 시험 장비를 제작하고 출력값으로부터 동적 물성치를 얻을 수 있는 시스템을 구축하였다.

2. 충격반향시험 시스템

2.1 충격원(impact source)

암석 내에 응력파를 전파시키려면 우선 충격장치를 사용하여 충격원을 발생시켜야한다. 충격을 가할 때, 충격장치와 시료 표면 사이의 접촉시간 및 접촉상태에 따라서 수신기에 출력되는 파형은 변화한다. 자세히 설명하자면, 충격장치와 대상 매질사이의 충격 접촉시간이 길어지면 수신기는 매질 내부로 전파되는 응력파 뿐만 아니라 간접적인 충격으로 인해 생기는 충격파를 동시에 수신하게 되므로 출력파형이 중첩되기 때문에 출력파형의 해석이 복잡해지는 문제가 생긴다. 반면, 충격시간이 짧아지면 출력파형의 해석 복잡성은 줄어들지만 충격량이 감소하기 때문에 응력파의 관통력이 약해지는 문제가 발생한다. 따라서 충격을 가할 때 적당한 접촉시간과 충격량이 보장되어야 합당한 시험결과를 도출할 수 있으므로 대상 매질에 적합하면서 항상 일정한 충격을 줄 수 있는 충격장치를 사용하는 것이 충격반향 시험에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

위의 내용을 간단한 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Input} \times \text{System Function} = \text{Output} \quad (1)$$

이 시험에서 각 항의 의미는 아래와 같다.

- Input = impact source
- System = waveform in the rock specimen
- Output = output waveform

결국 system function이 본 시험의 해(solution)가 되는 데, 이를 구하기 위해 충격파를 입력값으로 주고 오실로스코프를 이용해 출력값을 저장한다. 이 때 충격원이 디락 델타함수(Dirac's delta function)와 유사할수록 input은 상수함수에 가까워진다. 왜냐하면 시간 영역(time domain)의 디락 델타함수는 주파수 영역(frequency domain)에서 상수함수가 되기 때문이다. 다시 말해 충격시간을 짧게 할수록 입력값이 상수함수에 가까워져 출력값이 시스템과 흡사해지기 때문에 보다 정확한 해(암석내부 파형)를 얻을 수 있게 된다.

일반적으로 충격해머, 쇄구슬, 압전센서 등이 충격장치로 사용된다. 충격해머는 사용이 편리한 장점이 있는 반면 충격을 줄 때마다 충격파의 진폭 및 접촉시간이 일

정치 않은 단점이 있다. 쇄구슬은 보통 스프링으로 쇄구슬을 튕겨주는 장치를 이용해 충격파를 발생시킨다. 이 경우 쇄구슬과 대상 매질의 접촉시간이 30~50 μs 인 것으로 알려져 있다(Lin et al., 1990). 하지만 매질에 적합한 대역의 충격파를 발생시키기 위해 쇄구슬의 크기 및 스프링의 탄성을 경험적으로 결정해야 하는 불편함이 있다. 또한 압전기의 압전소자를 사용하여 충격파를 발생하는 경우에도 암석 시료에 적합한 주파수 대역을 미리 찾아낸 후 시험을 수행해야하기 때문에 사전에 시행착오를 거쳐 적절한 전압치를 찾아내야하는 작업이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 효율적으로 시험을 수행하기 위하여 발생 주파수대역이 이미 알려져 있는 미국 PCB사의 충격해머 모델 086D80을 사용하였다.

2.2 수신 장치(displacement transducer)

수신 장치는 덴마크 Bruel & Kjaer사의 Accelerometer Type 4384를 이용하였다. 수신 장치(가속도계)는 Fig. 1에서 하단의 철재 원판이며, 상단의 장비는 수신기와 오실로스코프 사이에 전기신호를 전달해주는 커넥터 및 케이블이다. 수신 장치의 주요 사양은 Table 1과 같고, 여기서 g는 중력가속도이며 단위는 ms^{-2} 이다.

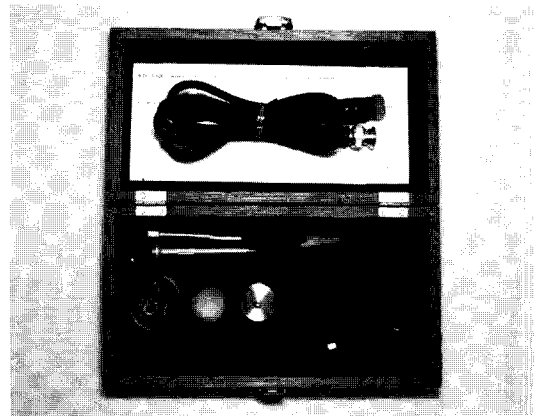


Fig. 1. Accelerometer cable (above) and transducer (below)

Table 1. The specifications of the accelerometer 4384

Contents	Values	
Charge Sensitivity	9.75	pC/g
Voltage Sensitivity	7.89	mV/g
Natural Frequency	62	kHz
Resonance Frequency	15	kHz
Minimum Resistance	20.0	M Ω

2.3 파형 분석 장치(waveform analyzer)

본 연구에 사용된 파형 분석용 오실로스코프는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 Tektronix사의 TDS 5034 모델이다. 본 기기에는 수신 장치에서 받아들인 파형을 디지털 신호로 변환해주는 FFT(Fast Fourier Transform) 기능이 내장되어 있다. 오실로스코프의 주요사양은 Table 2와 같다.

2.4 양단자유 프레임

본 연구에서는 암석 시편의 양단 자유 경계조건을 실현하기 위해 철제 프레임을 사용하여 Fig. 3과 같이 암석 시편을 공중에 매달 수 있게 프레임을 제작하였다. 양단 자유 조건에서는 양 끝단에서의 변형률이 0이 되어야 하기 때문에 변위크기인 U_n 에 대해 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$U_n = C \cos \frac{n\pi x}{l} = C \cos \frac{w_n x}{v_c} \quad (2)$$

여기서, U_n 는 시편 종방향에 따른 변위크기, C 는 상수, l 는 시료의 길이, w_n 는 각주파수, v_c 는 충격파 속도, x

는 끝단으로부터의 거리이다. 식 (2)를 이용하면 충격파 속도로부터 주파수(f_n)를 식 (3-1)과 같이 추측할 수 있다. 여기서, $n=1$ 일 때의 파가 진폭이 가장 크기 때문에 이때의 주파수를 공진주파수라고 한다. n 이 각각 1, 2, 3인 경우의 파형의 형태는 Fig. 4에 도시되어 있다 (Richard et al., 1970).

$$f_n = \frac{nv_c}{2l} \quad (\because w = 2\pi f) \quad (3-1)$$

본 연구에서는 탄성파속도 측정기를 이용하여 암석의 P파 및 S파 속도를 결정했기 때문에 탄성파 속도 측정에 필요한 충격해머용 트리거(trigger)는 사용하지 않았다.

3. 시험 결과 및 분석

본 연구에서는 7가지 재료를 대상으로 시험을 실시하였다. 시험대상 재료들의 정적인 물성은 Table 3과 같다. 이 중 시험 시스템의 검증을 위해 알루미늄 합금을 시험대상에 포함시켰다.

본 연구에서 구축한 시험 시스템은 암석의 동적 물성

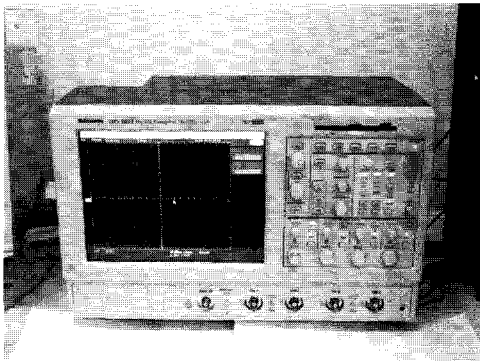


Fig. 2. A front view of the waveform analyzer, digital phosphor oscilloscope TDS 5034

Table 2. The specifications of the digital phosphor oscilloscope TDS 5034

Contents	Values
Bandwidth	350 MHz
Sample Rate	5 GS/s
No. of Channel	4
No. of Max. Record Length	8×10^6
Time Resolution	1 ns
Max. Duration	8 ms

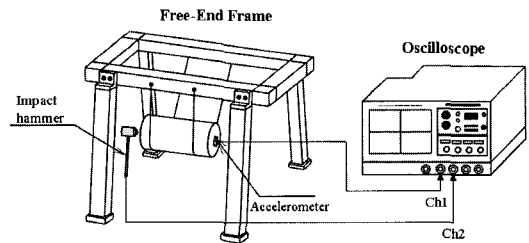


Fig. 3. A schematic diagram of the impact-echo testing system

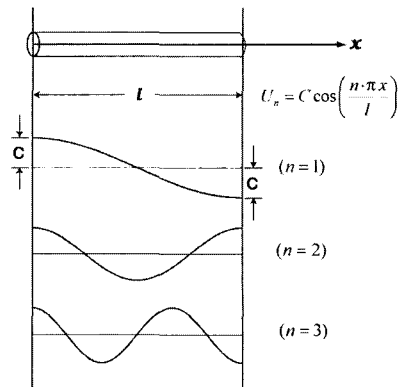


Fig. 4. Normal modes for free-free rod (Richard et al., 1970)

Table 3. The physical properties of the sample specimens

Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus E _s (GPa)	Poisson's Ratio (ν)
			P wave	S wave			
Cement mortar	2.13	14.3	3660	1830	38	22.0	0.20
Hoodong granite	2.94	0.67	4720	2400	91	47.3	0.26
Pocheon granite	2.63	1.24	2860	1710	144	45.2	0.22
Pusan granite	2.48	0.51	3170	1850	36	14.6	0.18
Whangdeung granite	2.66	0.6	3280	2000	139	23.0	0.18
Ham-an shale	2.70	0.73	3320	1700	73	24.5	0.27
Aluminum alloys 6061-T6	2.70	-	7790	3710	-	70.0	0.33

치를 구하고자 하는데 그 목적이 있다. P파 및 S파의 탄성파 속도는 식 (3-2)를 통해서 다음과 같이 구할 수 있다. 이 때 P파 및 S파의 공진주파수는 1차 모드에서 발생하기 때문에 n=1이며, 공진주파수는 Fig. 5의 주파수 영역 그래프에서 첨단부의 좌표를 읽어 구할 수 있다.

$$v_c = \frac{f_n \cdot 2l}{n} \tag{3-2}$$

그리고 주파수영역 그래프에서 half-power band width method를 이용하여 P파 및 S파에 대한 재료 감쇠비(damping ratio)를 구하였다. 이 수식은 다음과 같다.

$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \tag{4}$$

여기서, D는 감쇠비, f_r는 1차 모드 공진주파수 f₁, f₂는 공진주파수의 1/√2 배에 해당하는 주파수이다. 진폭의 제곱이 에너지와 비례하기 때문에 최대에너지의 1/2배가 되는 지점을 찾기 위해 최대진폭의 1/√2 배에 해당하는 진폭의 주파수(f₁, f₂)를 각각 찾게 된다. 이 내용을 그림으로 표현하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 5에서 상단의 그래프는 충격원을 주고 난 후 가속도계에 측정된 암석내부 응력파의 진폭을 시간 영역에 대해 도시한 것이다. 충격원이 최초 감지되고 난 후 일정 비율로 감쇠하는 양상을 보여주고 있다. 이 시간 영역의 데이터에 FFT 변환을 거치면 Fig. 5 하단의 주파수 영역의 그래프를 획득할 수 있다. 이 그래프에서 30 kHz 영역에 해당하는 첨단부는 종파의 공진양상을 보여주고 있으며, 15 kHz 근방의 첨단부는 횡파의 공진양상을 보여주고 있다.

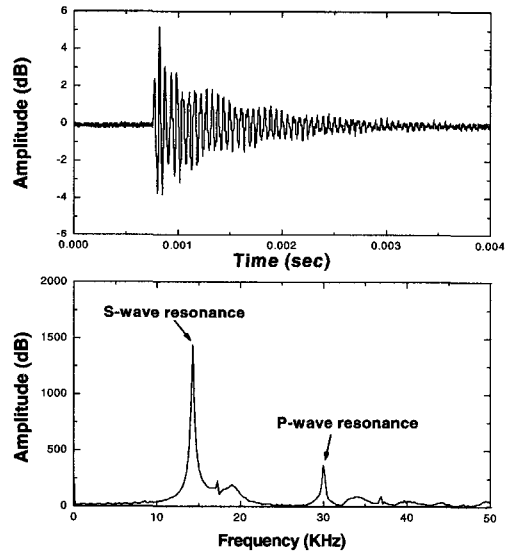


Fig. 5. Typical output data on the time domain and the FFT result on the frequency domain

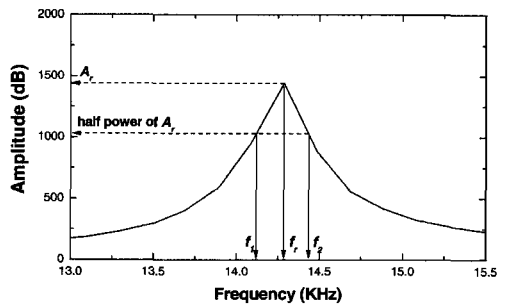


Fig. 6. Determination of damping ratio by half-power bandwidth method

이와 같은 방법을 이용하여 Table 3에 제시되어 있는 시료에 대해 충격반향시험을 수행하여 종파 및 횡파의 공진주파수 대역과 감쇠비를 결정하였다. 그 결과는 정적 물성치와 함께 Table 4에 정리하였다.

일반적으로 동탄성계수는 일축압축 시험으로부터 구한 정탄성계수보다 상대적으로 높은 값을 나타내는 것으로 알려져 있다(복영진, 1999). 암석과 같은 마찰성 재료는 변형률이 증가함에 따라 응력-변형률 곡선의 기울기가 감소하는데, 충격반향시험에서는 10^{-6} 이하의 변형률이 발생하므로 $10^2 \sim 10^3$ 정도의 변형률 범위를 가지는 일축압축 시험에서보다 탄성계수가 높게 측정된다는 것이다(복영진, 1999). 하지만 본 시험에서는 정탄성계수와 동탄성계수의 결과치가 10% 내외의 차이를 보이는 유사한 값이 도출되어서 위와 같은 경향을 확인할 수는 없었다.

불연속면이 발달하거나 점토층이 끼여 있는 암반에서는 정탄성계수와 동탄성계수의 차이가 확연히 드러나는 반면, 낮은 공극률을 가지는 암반에서는 이들 두 수치가 매우 유사해지는 결과가 보고된 바 있다(Barton, 2006). 이처럼 본 연구에서도 시멘트 시료를 제외한 시료 대부분이 1% 이하의 공극률을 가지고 있는 신선한 암석이었기 때문에 정탄성계수와 동탄성계수의 차이가 크지 않았던 것으로 판단된다.

감쇠비는 주파수 영역 그래프의 첨단부를 해석하여 산출되는 값인데 그래프의 첨단부 영역이 더욱 확연히 드러날수록 감쇠비는 감소하게 된다. 그래서 이 그래프를 해석함으로써 대상 매질에 취약한 특정 주파수 대역 정보를 미리 얻을 수 있는 것이다. 암석의 경우, 절리가 발달하거나 풍화도가 높을수록 감쇠비는 증가한다. 암

석 내부에 절리 및 균열과 같은 결함이 많이 존재할수록 시료 내부의 충격파의 전달 및 공진이 어려워져 주파수영역 그래프가 전체적으로 평탄해지기 때문이다. 본 연구 결과에서도 상대적으로 풍화도가 높은 부산화강암과 절리를 포함하고 있는 함안세일의 감쇠비가 다른 암석 시료에 비해 2~3배 정도 높게 측정되어 위와 같은 현상을 확인할 수 있었다(Table 4).

4. 결론

본 연구에서는 암석의 동적 물성치를 측정할 수 있는 자유단 진동 시험 시스템을 구비하여 국내 암석 5종 및 시멘트 모르타르와 알루미늄 합금에 대해 충격반향시험을 수행하였다. 이를 통해 동적 물성치를 측정하고, 1회의 충격으로 P파 및 S파의 공진주파수 및 감쇠비를 결정할 수 있었다.

일반적으로 동탄성계수는 정탄성계수보다 상대적으로 높은 값을 나타내는 경우가 많은 것으로 알려져 있다(복영진, 1999). 하지만 시험 결과에서는 확실히 이러한 경향이 나타나지는 않았고, 일부 경암을 제외한 암석의 경우 동탄성계수와 정탄성계수는 10% 내외의 차이를 가진 유사한 결과치가 도출되었다.

동포아송비는 정포아송비에 비해 0.07 이상 높은 값이 계산되었다. 충격 하중 하에서 암석 시료가 탄성거동을 하여 체적변형이 거의 없었기 때문에 높은 동포아송비가 도출된 것으로 판단된다.

풍화가 진행되었거나 절리를 포함하고 있는 암석의 경우 감쇠비가 증가하게 된다. 본 연구 결과에서도 상

Table 4. The dynamic properties of the sample specimens

Type	Static			Dynamic				
	UCS (MPa)	Young's Modulus E_s (GPa)	Poisson's Ratio (ν)	Young's Modulus E_d (GPa)	Shear Modulus G_s (GPa)	Poisson's Ratio (ν)	Damping ratio	
							P wave	S wave
Cement mortar	38	22.0	0.20	26.3	9.9	0.33	2.735	4.209
Hoodong granite	91	47.3	0.26	45.4	17.1	0.33	0.672	2.072
Pocheon granite	144	45.2	0.22	40.0	16.4	0.22	1.198	2.800
Pusan granite	36	14.6	0.18	14.9	6.0	0.24	5.810	5.798
Whangdeung granite	139	23.0	0.18	30.2	12.5	0.20	0.771	3.711
Ham-an shale	73	24.5	0.27	25.3	9.6	0.32	2.670	7.100
Aluminum 6061-T6	-	70.0	0.33	102.6	37.9	0.35	0.569	1.123

대적으로 풍화도가 높은 부산화강암이나 불연속면을 포함하고 있는 함안세일의 감쇠비가 일반 암석에 비해 2~3배 정도 높은 값을 보였다.

5. 토의 및 고찰

충격해머를 통해서 감쇠비를 결정하는 현재의 방법은 충격을 줄 때마다 충격강도 및 접촉시간 그리고 시료표면 상의 충격점이 변화하기 때문에 매번 약간씩 다른 출력파형이 기록된다. 이 때문에 동일한 시료에 대한 공진주파수 및 감쇠비 결과치도 10% 정도의 편차를 보였다. 그러므로 매회 일정한 영역의 진폭과 주파수를 줄 수 있는 압전센서를 이용한다면 보다 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 중 '급속 터널 기계화 시공을 위한 최적 굴착설계 모델 개발' 연구 사업(04핵심기술A01-07)의 지원으로 수행되었음. TBM 디스크 커터에 의한 대상 암반의 파괴거동에 관한 동적 기초물성 자료로 이용하는 데 연구의 목적이 있음.

참고문헌

1. 목영진, 1999, 자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정, 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제4호, pp. 95-100.
2. 신종진, 전석원, 2000, 암석 내의 균열전파에 따른 유효탄성계수의 변화, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), 제10권, pp. 301-308.
3. 조미라, 김기봉, 조성호, 2000, 콘크리트 구조물 비파괴 평가를 위한 수정 충격반향 기법의 제안, 건설환경논문집, 제12권, 제1호, pp. 173-186.
4. ASTM, 2003, Standard test method for Fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens, designation: C215-02.
5. Barton, N., 2006, Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, Taylor & Francis, pp. 3-48.
6. Lin, J., Sansalone, M., and Carino, N. J., 1990, Finite element studies of the Impact-Echo Response of plates containing thin layers and voids, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 9, No. 1, pp. 27-47.
7. Richard, F. E., Woods, R. D., Hall, J. R., 1970, Vibration of soils and foundations, Prentice-Hall Inc. pp. 5-80.



조 정 우

2002년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2005년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료

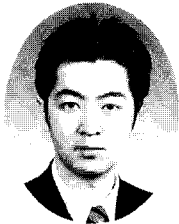
Tel: 02-880-8703
E-mail: cho79@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 석박사통합과정



임 보 성

2006년 충북대학교 자연과학대학 지구환경과학과 이학사

Tel: 02-875-6255
E-mail: thisih@gpl.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 석사과정



조 호 범

2002년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학사

Tel: 02-880-8224
E-mail: hobumvs@gpl.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 석사과정



전 석 원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 부교수



하 희 상

1991년 서울대학교 자원공학과 공학사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 031-713-7519
E-mail: hsha@geomax.co.kr
현재 지오맥스(주) 대표이사