터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 10, 2000, pp. 486~491

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 10, 2000, pp. 486-491
J. of Korean Society for Rock Mech.

디지털 필터를 이용한 진동의 변환 연구

김용국[1] · 김 식[1] · 이상은[1] · 양형식[2]

Transformation of Measured Blasting Vibration Data to Vibration Level by Digital Filter

Yong-Kuk Kim, Sik Kim, Sang-Eun Lee and Hyung-Sik Yang

ABSTRACT Blasting vibrations velocity had been used to design blasting pattern and predict damage-possibility of structures. As vibration levels are currently required to estimate the damage concerning human-body and livestock, so measured vibration velocities must be transformed into vibration levels. In this study, the digital filter program was developed to transform measured data into vibration levels. Simple harmonic vibrations and measured data obtained by Blastmate series (Instantel Inc.) were applied to the digital filter program. As a result, simple harmonic vibrations and measured data were successfully transformed into vibration levels using the developed program. Measured data from any instrument with ASCII output-function will similarly be transformed into level units.

Key words : digital filter, simple harmonic vibration, FFT, root mean square

초 록 발파 진동은 보통 지반진동속도로 계측되며, 발파설계나 구조물의 피해 산정에 적절하게 사용된다. 그러나 발파 진동에 의한 인체의 반응이나 가축의 피해 산정 등의 문제에서는 현행 소음진동규제법에서 명시하는 바, 인체의 감각적 감응척도에 충실한 진동레벨을 주로 사용하므로 변환문제가 발생한다. 본 연구에서는 발파 진동 계측기기로 계측한 데이터를 디지털 필터로 처리하여, 진동레벨로 변환하는 프로그램을 개발하고, 이를 단순조화진동과 실제 발파계측결과에 적용하였다. 그 결과, 단순조화진동은 물론이고 국내에서 널리 사용되고 있는 Instantel Inc.의 Blastmate series에서 계측된 진동데이터도 정밀도 높은 진동레벨로 변환이 가능하였다. 비슷한 정밀도로 계측결과를 ASCII file로 송출할 수 있는 기종에서 계측된 자료도 같은 정도로 처리할 수 있을 것으로 판정되었다.

핵심어 : 디지털 필터, 단순조화진동, FFT, 실효값

1. 서 론

우리 나라 국토의 70%가 산림으로 이루어져 있기 때문에, 사회기반 시설, 도심지의 건축공사, 도로공사 등 각종 건설현장에서 암반의 돌출은 필연적이며, 암반의 제거 방법으로 발파는 필요한 공사 방법의 하나가 되어있다. 그러나, 공사 중 발파로 인하여 발생하는 진동은 주변의 구조물과 인체에 영향을 미치게 되어 공사장 주변에 있는 주민과 마찰을 일으키게 된다. 이 때, 계측된 진동자료는 공사 중 주변 구조물과 인체에 대한 피해 판정의 중요한 자료가 되는데, 우리 나라 소음·진동 규제법[1]에서는 발파의 진동 계측항목으로 진동레벨 dB(V)을 측정하도록 규정하고 있다. 그러나, 현장에서 사용되고 있는 계측기의 대부분이 진동속도로 계측되고 있어, 민원이 발생하였을 때는 시공중 계측한 진동속도 자료는 피해를 입증하는 근거로서 이용되지 못하고, 새로운 진동레벨의 계측자료를 필요로 하게 된다. 그러므로, 처음부터 진동레벨 측정기로 계측되지 않은 자료는 무의미하게 되며, 피해판정을 위하여 다시 계측해야 하는 번거로움이 발생하게 된다[2]. 현재까지 진동을 변환하는 방법으로 근사식에 의한 방법과 주파수에 의한 보정방법[3] 등이 이용되어 왔으나, 상관성이 낮아 실제 적용에는 어려움이 있다.

1)정회원, 한암발파기술사 사무소
2)정회원, 전남대학교 자원공학과 교수
접수일 : 2000년 7월 31일
심사 완료일 : 2000년 8월 31일

본 연구에서는 위와 같은 진동레벨 계측기를 별도로 사용하지 않고, 발파 진동 계측기기로 계측한 진동속도 데이터를 디지털 필터로 처리하여, 진동레벨로 변환할 수 있는 방법을 개발하였다.

2. 디지털 필터의 설계

2.1 디지털 필터의 정의

디지털 필터의 기본이 되는 convolution은 푸리에 변환에서 곱셈으로 나타내어진다. 시간의 연속함수로 표현하는 측정파형, 전달함수, 필터링 결과를 디지털화 하면 각각 x(t), w(t), y(t)이며, 각각의 푸리에 변환을 각주파수 ω의 함수로 나타내면 X(ω), W(ω), Y(ω)로 되고, 이들은 다음과 같은 시간의 관계가 성립된다(단, *은 convolution 연산을 나타낸다)

$$y(t)=x(t)*w(t)\Rightarrow Y(\omega)=X(\omega)\cdot W(\omega)$$

위와 같은 방법을 이용한 전달함수의 푸리에 변환은 주파수의 특성 W(ω)로 나타나게 된다. 이것은 W(ω)가 일반적인 필터함수가 된다.

주파수영역에 대한 필터링은 측정파형을 푸리에 변환하여 대응하는 직접 필터함수를 곱하는데 이것의 결과를 푸리에 역변환을 실시하면 필터링된 파형을 얻을 수 있다. 따라서, 푸리에 변환 조작은 2번이 필요하다. 푸리에 변환은 통상 고속푸리에변환(FFT)의 알고리즘을 이용한다.[4,5]

Fig. 1.은 잡음성분을 주파수 영역법으로 제거한 예이다. Fig. 1의 (a)는 생성 데이터이고, (b)는 데이터의 512점을 FFT를 이용한 변환의 결과로 실수부만을 나타내고 있다. 여기에서 잡음성분을 분리하기 위해서는 필터함수로 이 부분을 제거한다. (c)는 푸리에 역변환의 결과로써 고주파의 잡음이 제거된 그림이다.

2.2 Filtering

구조물에 대해서는 진동속도가 잘 적용될 수 있으나, 인체의 감각은 Weber·Fechner의 법칙에 따라 대수척도로 대응하므로, 레벨로 표현한 진동레벨 dB(V)을 사용한다. 진동레벨은 인체로 느끼는 진동의 감각을 나타내는 양으로서, 진동의 크기를 표현하는데 사용된다.

진동문제에 있어서는 건물의 피해에 대해 최대 진동속도로 규제하는 방법이 널리 사용되었으나, 인체의 감응을 중요시하는 최근 추세에 따라 dB을 적용하고 있다. 가속도 레벨은 진동 가속도를 dB 단위로 나타낸 것이다. 진동가속도 레벨은 지반의 진동가속도를 비교단위인 dB로 나타내는 것이며 그 식은 다음과 같다.

$$VAL = 20\log\frac{A_{rms}}{A_r}\ (dB) \tag{1}$$

A_{rms} = 진동가속도의 실효치(m/s^2)

A_r = 진동가속도의 기준치($10^{-5}m/s^2$)

(1)식은 인체감각에 비례하는 물리량이긴 하지만, 진동이 인체 또는 건물 등에 미치는 영향은 진폭과 진동수에 의존하지만 수직진동과 수평진동에서는 감지방법이 다르다. ISO(국제표준화기구)에서 발표한 인체의 진동에 대한 진동폭로기준(가속도레벨)을 대역별 진동감각으로 보정한 것이 진동레벨이다. 진동레벨(Vibration Level, 이하 VL로 표시)은 1~90 Hz 범위의 주파수 대역별 진동가속도 레벨을 상하 및 수평 방향 진동에 대한 인체의 상대응답으로 보정한 것을 말하며, 그 식은 다음과 같다.

$$VL = VAL - W_n\ (dB) \tag{2}$$

W_n = 인체감각에 대한 주파수별 보정치

W_n은 수직 및 수평 방향 진동에 대한 주파수 보정치

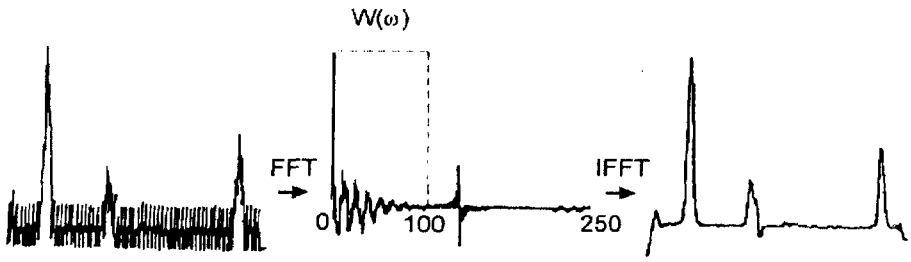


Fig. 1. Data processing by digital filter.

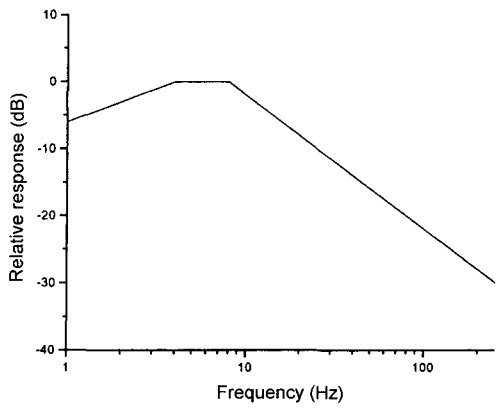


Fig. 2. Vibration level weighting curve to the vertical component.

로, 수직방향의 주파수 보정은 (1)식의 A_{rms}를 (3)식과 같이 주파수별로 보정한 값이며, (3)식을 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

$$A_r = 2\times10^{-5}\times f^{1/2} \quad (1\le f\le 4\ \text{Hz})$$
$$A_r = 10^{-5} \quad (4\le f\le 8\ \text{Hz}) \qquad (3)$$
$$A_r = 0.125\times10^{-5}\times f \quad (8\le f\le 90\ \text{Hz}))$$

본 연구에서 이용된 발파진동필터는 이러한 등감각곡선을 이용하여 설계하였다. 발파진동 측정기의 샘플링 주기는 1/1024 초로 측정이 되는데, 인체의 진동에 대한 감각은 발파 진동의 주파수가 4~8 Hz에서 가장 민감하게 반응하고 250 Hz 이상의 주파수대의 측정 자료는 에일리어싱(aliasing)현상과 샘플링의 오차가 발생하게 되므로 90 Hz 이상의 주파수 대역은 제거하였으며, 1~90 Hz 주파수대에서 Fig. 2와 같은 등감각곡선을 이용하여 필터링하였다.

2.3 실효값(rms, root mean square)의 적용

진동은 파동 현상의 일종으로, 파동의 전파에 있어서 진동수와 진폭은 중요한 역할을 하게된다. 그래서 진동은 파동론의 범주에 속하는 문제로 다루는 경우가 많다. 가장 단순한 평균값은 순간 측정값 자체의 시간 평균을 구하는 것이다. 그러나, 진동은 시간에 따라서 빠르고 불규칙하게 변하기 때문에 양의 측정을 위해서는 새로운 평균값의 개념을 도입해야 한다. 시간 신호 순간값의 평균값은 그 신호에 포함된 에너지 양과 직접 관련되는 양으로 물리적으로 중요한 개념이다. 어떤 물리양 X(t)의 측정시간 폭 T에 대한 실효값[6]은 다음과 같다.

$$\text{실효값 } X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T X^2(t)dt} \qquad (4)$$

진폭은 어떤 순간에 있어서의 진동량 최대치(peak value)이다. 진동하는 물리량을 일정한 크기의 물리양이 지속되는 경우와 대비하기 위하여 진폭에 대한 비례치로 표현한 것이 실효치이다.

본 연구에서 이용된 진동레벨계측기는 시간반응회로 즉, 실효치가 Slow로 측정되는 계측기이므로 디지털신호의 실효치를 Slow 반응회로와 유사한 값이 되도록 하기 위하여 식(4)에서 적분구간을 1초로 하여 계산하였다. Slow는 오름시간이 1초이고 내림시간도 1초이다. 만일 Fast로 계산한다면 Fast회로의 오름시간이 0.125초이고 내림시간이 0.125초이므로 적분구간을 0.125초로 하여 1/1024초 간격으로 측정시작시간부터 종료시간까지 반복하여 적분하면 된다.

2.4 진동변환 알고리즘

진동레벨계측기는 계측된 전기신호를 증폭기에서 증폭하여 전기식 필터를 통과 한 후, 다시 증폭기를 거쳐 정류회로에 입력된다. 정류회로는 교류신호를 직류신호로 변환하는 역할을 하여 정류회로에 입력된 교류신호는 실효값으로 변환하는 것이다. 이렇게 얻은 신호는 Log 변환장치를 거쳐 레벨로 표시된다. 진동레벨변환 프로그램의 알고리즘은 이러한 계측기의 변환과정을 수행하는 것이다.

김[3]이 연구한 FFT를 이용한 진동레벨 변환 방법은 가속도 데이터를 FFT를 수행한 후 시간에 따른 가속도를 주파수에 대한 가속도로 변환하여 가속도의 실효치를 상대응답으로 보정한 것을 합산하여 진동레벨을 구하였으나, 그 결과가 실제 계측치와의 상관성이 낮게 나타났다. 그러나, 본 프로그램은 발파진동 계측자료를 가속도로 바꾸고 FFT를 수행하여 주파수별로 가속도에 보정치를 곱한다. 식 (2)에서의 보정치는 Log함수내에서 곱으로 계산하는데, 이 과정을 필터링이라 한다. 보정된 주파수별 가속도는 역푸리에 변환을 통하여 다시 시간에 대한 가속도로 나타나게 된다. 이렇게 하여 얻어진 가속도의 실효치를 계산하여 (1)식에 대입하면 진동레벨이 계산된다. 프로그램의 대략적인 연산과정을 Fig. 3에 나타냈다.

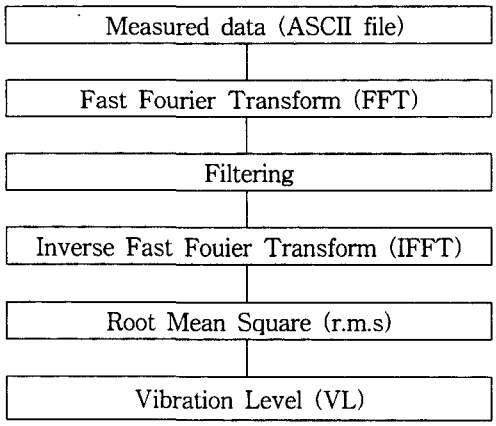


Fig. 3. Algorithm of digital filter.

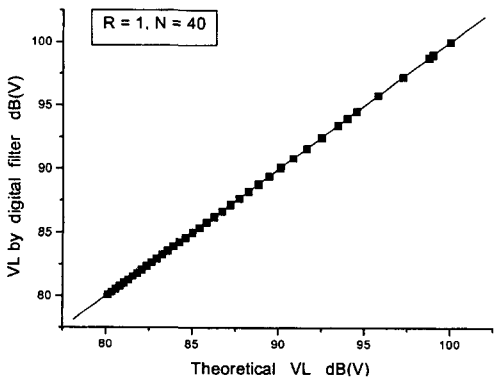


Fig. 4. Comparision of theoretical VL and VL by digital filter.

2.5 프로그램의 검증

실제 발파진동은 대단히 복잡한 파들의 조합으로 이루어져 있으나, 프로그램내의 FFT과정과 필터링, IFFT, 실효치보정 등의 연산과정에서 발생할 수 있는 오류를 검증하기 위하여, 이론적 계산값을 얻을 수 있도록 수학적으로 단순화한 단순조화진동 파형을 입력파형으로 가정하였다.

즉, 단순조화진동 파형을 입력파형으로 하고 디지털 필터를 이용한 변환프로그램의 결과와 이론적으로 계산한 값의 결과를 상호 비교하여 변환 프로그램의 정확성을 검증하고자 하였다.

Fig. 4는 1~90 Hz까지 2 Hz 간격으로 분석한 그림으로, R은 상관계수이고, N은 자료의 수이다. 이론에 의한 계산값의 결과와 디지털 필터를 이용한 결과는 정확하게 일치함으로써 본 프로그램의 타당성이 검증되었다.

3. 발파진동 계측 및 고찰

3.1. 계측 및 현장조건

본 연구에서 진동레벨측정기로 측정된 진동레벨값과 진동속도 data를 Digital Filter로 처리한 진동레벨값과의 비교·검토를 위하여, 진동속도는 sampling rate가 1,024 samples/second인 Instantel Inc.의 BlastmateII(DS-477)로 계측하였으며, 진동레벨은 아날로그 방식인 Rion사의 VM-52로 계측하였다. 발파진동 계측장소는 전주-구이간 도로공사 현장과 남원 노암로 도로 공사현장, 군장 국가산단(군산지구) 개발사업 조성공사장(1-4공구)이며, 진동속도와 진동레벨을 동시에 측정하였다. 전주-구이간 도로공사 현장의 지질 분포는 상부는 풍화토층으로 덮여 있고, 하부는 수직, 수평절리가 발달한 편마암 계열의 암석이 주류를 이룬다. 지발당 장약량은 5~13 kg을 사용하였으며, 계측 지점은 발파장소에서 90~110m 떨어진 단독주택 마당이다. 남원 노암로 도로공사 현장은 발파지점 상부만이 약간 풍화된 화강암이고, 그 이외는 절리가 거의 존재하지 않는 신선암이다. 압축강도는 1950 kg/cm^{2}로 비교적 높은 강도를 갖고 있다. 지발당 장약량은 0.5~1 kg이며, 계측지점은 발파장소에서 40~50m떨어진 지점이다. 군장지역은 변성퇴적암이 주류를 이루고 있으며, 대부분의 암석은 해수의 침식 등에 의하여 암반강도가 낮은 풍화암이다. 계측지점은 발파장소에서 40~70m 떨어진 장소이고, 지발당 장약량은 10~15 kg 이다.

3.2 진동변환결과 고찰

진동레벨변환의 정밀도를 기존의 주주파수(z-c frequency)에 의한 방법 및 근사식에 의한 방법과 본 연구에서 개발한 디지털 필터에 의한 방법에 대해서 비교·검토하였다.

3.2.1 최대가속도와 주주파수에 의한 진동레벨 변환법

일반적으로 이용되는 방법인 최대가속도와 그 때의 주파수를 이용하여 변환한 진동레벨과 진동레벨 측정기에 의한 측정값을 비교 분석한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 상관계수가 0.51로서, 상관성이 낮고 표준편차가 7.2 dB(V)로 매우 크게 나타나 실제 적용에는 어려움이 있다.

3.2.2 근사식에 의한 진동레벨의 변환법

진동속도와 진동레벨 각각의 계측기를 이용하여 실측한 진동속도(PPV-V성분)와 진동레벨과의 관계를 Fig. 6에 나타냈다. 진동속도와 진동레벨의 근사식은 (5)식과

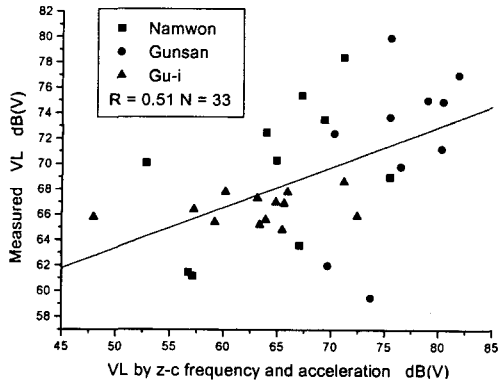


Fig. 5. Relationship between VL by z-c frequency and measured VL.

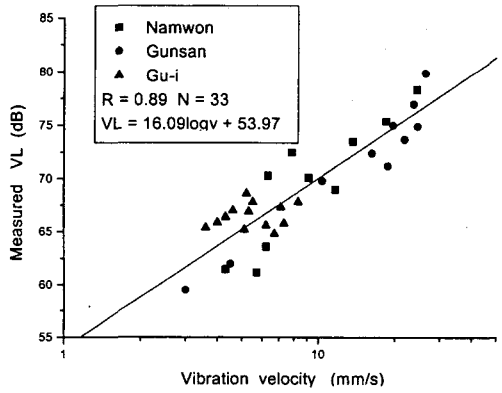


Fig. 6. Relationship between vibration velocity and measured VL.

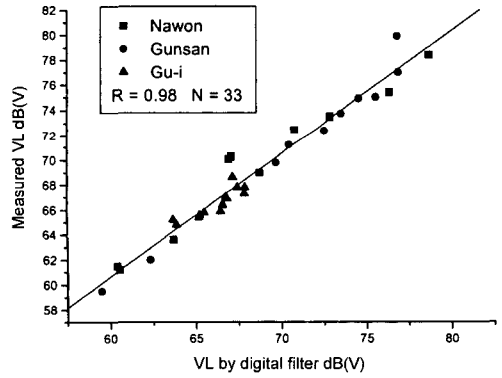


Fig. 7. Relationship between VL by digital filter and measured VL.

같으며, 상관계수 0.89, 표준편차는 2.3 dB(V)로 최대가속도와 주주파수를 이용한 방법보다 양호한 결과를 나타내고 있다.

Table. 1. Relationship between filter, app. function, and z-c frequency.

	Coef. of determination	Standard deviation dB(V)
Z-c frequency	0.51	7.21
Approximation function	0.89	2.3
Digital filter	0.98	1.0

$$VL = 16.09 \log v + 53.97 \quad \text{dB(V)} \tag{5}$$

3.2.3 디지털 필터에 의한 진동레벨 변환법

디지털필터로 처리한 진동레벨과 진동레벨계측기를 이용하여 실측된 진동레벨과의 관계를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 상관계수 0.98, 표준편차 1.0 dB(V)로 상관성이 매우 높게 나타났다.

진동 가속도 또는 진동속도를 진동레벨로 변환하기 위한 세 가지 방법의 결과를 Table. 1에 정리하였다. 최대가속도와 그 때의 주파수를 이용하여 변환하는 방법과 진동속도(PPV-V성분)와 실측진동레벨에 의한 근사식으로 변환하는 방법보다는 디지털필터를 이용하여 변환하는 방법이 상관성이 매우 높아 실제 적용에 유효할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 디지털 필터를 이용하여, 발파현장에서 계측된 진동속도 자료를 진동레벨로 변환하기 위한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 진동변환 프로그램의 검토 차원에서 단순조화진동을 이용한 계산한 결과는 소수점 이하의 오차이외는 거의 동일한 값을 나타내어, 디지털 필터에 의한 진동변환 프로그램의 신뢰성이 검증되었다.

2) 본 연구에서 개발한 발파진동 변환 프로그램을 사용하여 발파진동속도를 진동레벨로 변환한 결과는 상관계수 0.98, 표준편차 1 dB(V)를 나타냈으며, 최대가속도와 그 때의 주파수를 이용하여 변환하는 방법, 진동속도(PPV-V성분)와 진동레벨에 의한 근사식으로 변환하는 방법에 비해 신뢰성이 매우 높기 때문에 실용적일 것으로 판단된다.

3) 현장조건 및 발파규모가 서로 다른 경우에도 진동레벨변환 결과는 상관성이 매우 높게 나타나므로, 다른 종류의 계측기도 ASCII파일로 출력할 수 있다면 현장조

건 및 발파규모에 상관없이 높은 정밀도의 진동레벨 변환결과를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 소음진동 규제법, 제정 1991.8.1, 법률 제 4259호(최신 개정 1997.3.7).
2. 양형식, 김남수, 1998, 소음·진동 규제법의 문제점, 터널과 지하공간, (한국암반공학회지), 8. 3, 178-183.
3. 김남수, 1999, 건설소음·진동의 예측기법과 그 적용에 관한 연구, 전남대학교 대학원 박사학위 논문.
4. 南 茂夫, 1996, 科學計測のための 波形デ-タ 處理, 102-105.
5. 배준기, 조남익, 1997, 신호와 시스템, 교보문고, 73~95
6. 은희준 외, 1997, 소음으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구, 환경부 분쟁조정위원회.

김 용 국

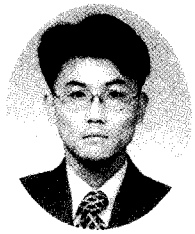
1998년 전북대학교 공과대학 자원공학과, 공학사

Tel : 063-227-4878

E-mail : hanam000@kornet.net

현재 전남대학교 대학원 자원공학과 석사과정

한암발파기술사사무소 대리



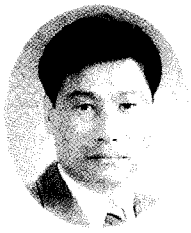
김 식

1996년 전북대학교 공과대학 자원공학과, 공학사

1998년 전북대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

Tel : 063-227-4878

현재 한암발파기술사사무소 과장



이 상 은

1986년 전북대학교 공과대학 자원공학과, 공학사

1992년 전북대학교 대학원 토목공학과, 공학석사

1996년 전북대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 062-227-4878

현재 (주)한암건설 대표이사

양 형 식

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사

1981년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

1987년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 062-530-1724

E-mail : hsyang@chonnam.ac.kr

현재 전남대학교 공과대학자원공학과 교수