

발파진동의 예측기법과 환경규제 기준으로의 변환 연구

김남수¹⁾ · 양형식²⁾

A Study on the Prediction & Transformation of Blasting Vibration for Environmental Regulation Standard

Nam-Soo Kim and Hyung-Sik Yang

Abstract. The estimation of proper prediction method and the transformation method of environmental regulation standard were carried out by measuring blasting vibration. Vibration velocity was more adequate than vibration level in the blasting design by scaled distance. Thus, design and construction must be controlled by vibration velocity, and it is required that the vibration velocity is transformed to vibration level to meet regulation standard. Three transformation methods were studied. First, transformation formula is derived from the shock vibration data only. The second method is the transformation by correlation equation of vibration velocity and vibration level measured at the same time. The last one is the transformation of vibration velocity by FFT. It seems to be difficult to estimate damages by these methods because that every method shows considerable error. But transformation formula of PPV component to vibration level was most practical.

Keywords: Blasting Vibration, Environmental regulation standard, Transformation

초 록. 발파진동을 계측하여 예측방법의 타당성을 검토하였고, 환경규제 기준으로의 변환방식을 규명하였다. 진동레벨과 진동속도의 환산거리 설계 적용성은 진동속도가 더 좋았다. 따라서 설계나 시공은 진동속도로 관리하고 이를 법적 기준인 진동레벨로 변환할 필요성이 있었다. 기존의 변환식 중에서 충격진동 데이터로만 구성하여 변환식을 구하였고, 동시에 측정된 진동속도와 진동레벨의 상관식에 의한 변환식을 구하였으며, 푸리에 변환을 하여 각 주파수 별로 감각보정하여 진동레벨을 구하였다. 세 가지 방법을 이용하여 변환한 결과 모두 오차가 있으므로 변환에 의한 피해 보상의 판정에는 무리가 있었으나, 그 중에서 발파시 동시에 측정된 수직방향 성분 PPV와 진동레벨의 변환식이 가장 실용적으로 판단되었다.

핵심어: 발파진동, 소음·진동규제법, 변환

1. 서 론

소음·진동에 대한 환경의식의 향상으로 민원이 발생할 우려가 있는 현장에서는 공사 단계에 법적인 근거 자료로 사용하기 위하여 발파소음과 진동을 계측하고 있다. 보통 국내의 발파 현장에서는 서울 지하철 공사에서 규제하였던 계측항목인 설계와 진동제어가 용이한 진동속도를 위주로 발파진동을 계측하고 있다. 그러나 소음·진동 규제법에서는 진동속도에 따른 규제치는 없고 수직방향 감각보정한 진동레벨을 측정하도록 되어 있어서, 민원이 발생할 경우에는 진동속도는 피해를 입증하는 법적인 근거가 되지 못하고 판례에 의해서 보상

이 이루어지고 있다.

이와 같은 문제점으로 본 연구에서는 규제법상의 측정항목인 진동레벨과 실제 발파현장에서 측정하고 있는 진동속도를 계측하여 측정항목에 의한 환산거리에 따른 설계 타당성을 비교해 보고, 측정된 진동속도를 법적인 규제치인 진동레벨로 각각 세 가지 방법으로 변환을 하여 문제점을 고찰하고 가장 타당한 변환 방법을 제안하였다.

2. 발파진동의 측정항목

2.1 진동속도

발파진동의 크기를 표현하는 방법에는 변위(cm), 속도(cm/s, kine), 가속도(cm/s^2 , gal) 등이 쓰이는데 그 중에 진동속도는 대부분의 발파 영향 평가시 적용되는 설계 항목으로 진동에 의한 구조물의 피해를 가장 타당성

¹⁾정회원, 전남대학교 공과대학 자원공학과 강사

²⁾정회원, 전남대학교 공과대학 자원공학과 교수

접수일: 2000년 6월 3일

심사 완료일: 2000년 7월 19일

있게 설명해 주고 있다. 따라서 발파진동은 보통 입자 진동속도를 계측한다.

발파진동에 영향을 미치는 요소는 화약류의 종류, 장약량, 장약밀도, 기폭방법, 전색정도, 자유면 수, 거리 및 매질의 전파속도 등이 있다. 특히 진동속도는 거리와 장약량의 함수로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$v = K \left[\frac{D}{W^b} \right]^n \quad (1)$$

여기서 v 는 입자 진동속도(cm/s), W 는 지발장약량(kg), D 는 발파폭원과 계측점 간의 거리(m), K 는 발파진동상수, b 는 장약지수, n 은 감쇠지수이다. 특히 K 와 n 은 그 지역 매질의 진동전달 특성을 나타내므로 이를 입지상수라 한다. b 가 1/2일 때를 제곱근 환산거리, b 가 1/3일 때를 삼승근 환산거리라고 한다.

2.2 진동레벨

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

진동가속도 레벨(Vibration Acceleration Level)은 지반의 진동가속도를 비교단위인 dB로 나타내는 것이며 다음과 같다.

$$VAL = 20 \log \frac{A}{A_0} \text{ (dB)} \quad (2)$$

A 는 진동가속도의 실효치(m/s^2), A_0 는 진동가속도의 기준치($10^{-5} m/s^2$)이다.

진동레벨(Vibration Level)은 1~80 Hz 범위의 주파수 대역별 진동가속도 레벨에 상하 및 수평 방향 진동에 대한 인체의 상대응답으로 보정한 것을 말하며 다음 식과 같다.

$$VL = VAL + W_n \quad (3)$$

W_n 은 상하 및 수평 방향 진동에 대한 주파수 보정치로, 상하진동에 대한 주파수별보정 가속도 실효치 A_1 는

$$\begin{aligned} 1 \leq f \leq 4 \text{ Hz} : A_1 &= 2 \times 10^{-5} \times f^{(1/2)} \\ 4 \leq f \leq 8 \text{ Hz} : A_1 &= 10^{-5} \\ 8 \leq f \leq 90 \text{ Hz} : A_1 &= 0.125 \times 10^{-5} \times f \end{aligned} \quad (4)$$

이고, 보정치는 $-20 \log(A_1/10^{-5})$ 의 식에 대입하여 구한

다. 진동레벨계의 지시미터에 나타나는 레벨은 각 주파수 대역별 진동가속도레벨에 해당 상대응답이 보정된 후 dB 합산된 값이며, 보정 방향에 따라 dB(V), dB(H)로 표기한다. 그러므로 인체에 대한 진동피해 기준은 진동레벨이 잘 표현해 주고 있다.

2.3 규제기준

우리나라 소음·진동 규제법은 발파진동과 관련된 독립된 규정은 없고, 광범위하게 제 23조(생활소음·진동의 규제)의 공사장 진동 규제치를 적용한다. 발파진동은 일반 공사장 진동 기준으로 충격성 여부에 관계없이 생활소음진동의 연장선에서 규제하고 있다. 소음·진동 규제법에 의하여 발파진동은 주간의 경우 대개 1일 작업시간이 4시간 이하이므로 +5 dB을 보정하여 진동레벨로 70 dB(V)가 규제치가 되고, 진동 속도는 적용하지 않고 있다.

외국의 경우는 충격성 진동의 규제기준이 연속성 진동보다 상당히 높기 때문에 발파와 같은 일시적인 진동은 설계를 기준으로 하는 진동속도를 주로 측정하고 있다.¹⁴⁾ 국제규정인 ISO 2631¹⁵⁾은 연속진동과 충격진동으로 구분하여 진동속도와 진동레벨을 평가항목으로 하여 주간의 경우 충격성 진동에 대해서는 20~30배 정도로 허용 기준을 높게 인정하고 있다. 국내에서는 발파진동에 대한 규제 기준이 시공적인 측면보다 환경적인 면을 부각하여 진동레벨로 되어 있고, 서울지하철 공사에서 적용된 진동속도 기준을 보편적으로 적용하고 있어서 인체에 대한 피해 여부를 판정하기는 곤란하다.

3. 발파진동의 예측기법과 변환

3.1 진동레벨과 진동속도의 설계 적용 비교

발파진동의 계측항목으로 구조물 피해 기준으로 적합한 진동속도와 인체의 피해기준으로 적합한 진동레벨 중에서 타당한 환산기준 변수에 의한 설계 가능성을 검토하여 보았다. 비교 대상은 광주의 순환도로 건설현장 두암동과 태봉 지역 2개소와 나주시 송현동 부지 조성 공사장으로, 동시에 진동속도와 진동레벨을 측정하여 환산거리 수준과 대비하였다. 발파는 지발당 장약량 0.25~ 6.5 kg/delay, 총장약량 2.5~195 kg, 계측거리 20~220 m에서 계측을 실시하였다.

Fig. 1~2는 광주와 나주의 계측 데이터 전체를 환산거리와 진동속도 및 진동레벨 수준을 나타낸 그림이다. 환산거리와 진동속도 수준에서는 상관계수가 0.63이었으나, 환산거리와 진동레벨 수준에서는 상관계수가

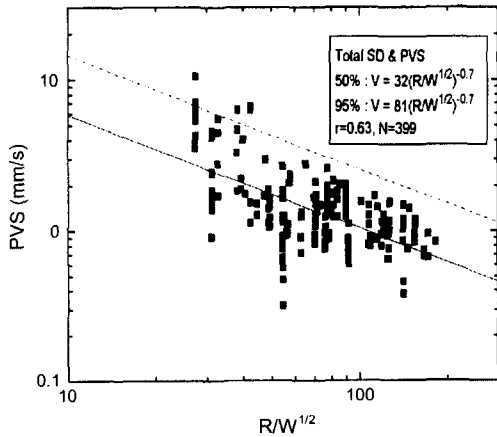


Fig. 1. Relationship between peak vector sum and square root scaled distance.

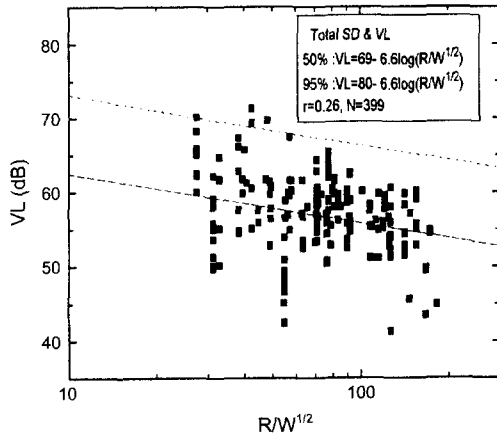


Fig. 2. Relationship between vibration level and square root scaled distance.

0.26으로 좋지 않은 결과를 보였다.

그러므로 환산거리를 이용한 발파설계와 진동제어에 있어서는 진동레벨을 이용한 것보다 진동속도를 이용하는 것이 더 합리적이므로, 설계나 시공은 진동속도로 관리하고 이를 진동레벨로 변환할 필요성이 있다.

3.2 진동속도와 진동레벨의 변환

진동으로 인한 민원 발생시 설계 목적인 진동속도를 법규에 제시된 진동레벨로 변환하기는 어려운 문제이다. 외국과 같이 진동속도를 규제 기준으로 제시하면 별 문제가 없으나 국내에서는 진동속도를 법규화시키지 않고, 주파수도 고려하지 않는 독일 기준의 하한치를 관례로 적용하고 있다. 발파현장에서 계측된 진동속도를

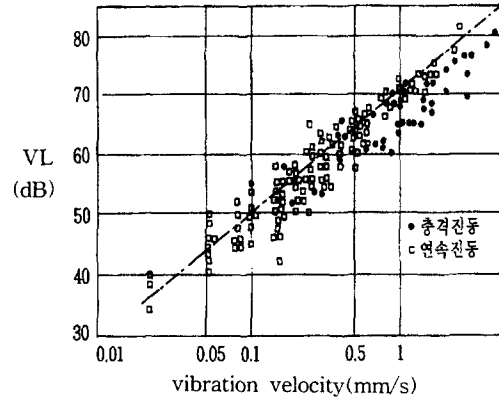


Fig. 3. Relationship between vibration velocity and vibration level.

법적인 규제치인 진동레벨로 변환을 하기 위해서 다음과 같은 방법을 시도하였다.

3.2.1 기존의 변환식을 충격진동 데이터로만 재구성

현재 제시된 환산식으로는 Fig. 3에서 진동속도의 최대치와 진동레벨의 평균 상관식은 진동수 8 Hz 이상의 조화진동일 때,

$$VL = 20 \log v + 71 \quad (5)$$

이다. 여기서 v 는 최대 진동속도치(mm/s), VL은 수직 보정한 진동레벨(dB(V))이다. 이 식은 sine 파에 근사하는 연속진동에 잘 맞으나 충격진동에는 잘 맞지 않으며 진동레벨이 과대평가 되는 경향이 있다. 이를 충격진동 데이터로만 재구성하여 Fig. 4에 나타내었다. 데이터 처리 결과 상관계수는 0.9로 상당히 높고 평균 예상식은

$$VL = 17 \log v + 67 \quad (6)$$

이며 95% 신뢰구간의 식은

$$VL = 17 \log v + 74 \quad (7)$$

으로 상관계수는 0.9이다. 이를 역으로 정리해 보면 주거지역에서 규제되어야 할 주간의 발파진동 규제치 70 dB(V)는 1.5 mm/s이며, 95%의 신뢰구간을 적용하면 0.58 mm/s로 진동레벨이 과대평가 되는 경향이 있으므로 (5)~(7)식을 이용하여 진동레벨을 추정하는 것은 대단히 불합리함을 알 수 있다.

3.2.2 동시에 측정된 진동속도와 진동레벨의 상관식에 의한 변환

진동속도와 진동레벨을 각각 측정하는 계측기를 동시에 설치하여 계측한 데이터를 이용하여 상관식을 구하였다. 계측에 사용된 환경진동계는 Japan Rion의

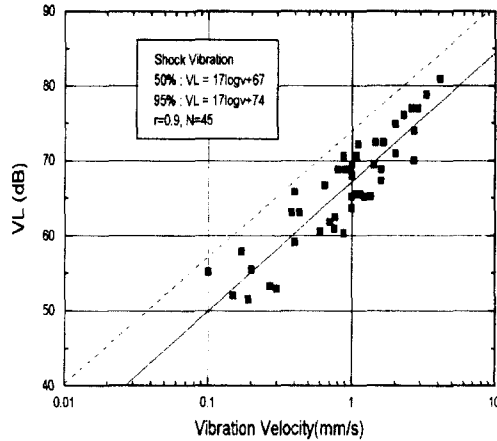


Fig. 4. Relationship between shock vibration velocity and vibration level.

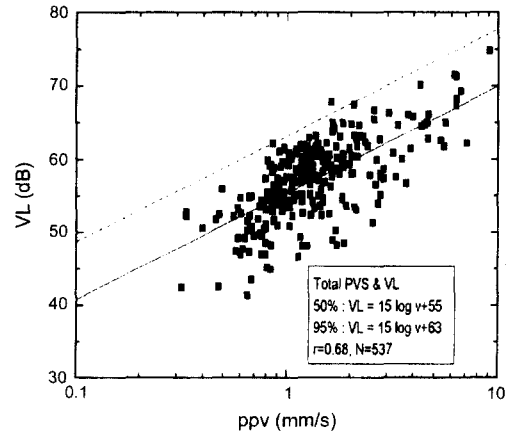


Fig. 5. Relationship between peak vector sum velocity and vibration level.

VM-52를 사용하였고, 계측지점은 광주 순환도로 건설 현장 2개소와 나주의 부지조성 공사장이다.

진동속도 PVS(Peak Vector Sum)와 진동레벨의 상관관계식을 구하였다. Fig. 5에서 전체 지역의 진동속도 PVS와 진동레벨 상관식은

$$\begin{aligned} 50\% : VL &= 15\log v + 55 \text{ dB(V)} \\ 95\% : VL &= 15\log v + 63 \text{ dB(V)} \end{aligned} \quad (8)$$

이고, 상관계수는 0.68이다.

진동레벨이 수직방향 주파수 보정한 것이므로 진동속도의 세 방향 성분 중에서 수직방향 성분 PPV와 진동레벨의 상관 관계식은 Fig. 6에서

$$\begin{aligned} 50\% : VL &= 16\log v + 59 \text{ dB(V)} \\ 95\% : VL &= 16\log v + 66 \text{ dB(V)} \end{aligned} \quad (9)$$

이고, 상관계수는 0.78이다.

Fig. 5와 Fig. 6을 비교하면 세 성분 벡터합성치의 변환식보다 수직방향 성분의 PPV와 진동레벨의 변환식이 상관성이 더 좋았다. 그러나 동시에 측정된 진동속도와 진동레벨의 상관식에 의한 변환은 $\pm 5\text{dB}$ 이상의 오차를 보이고 있으므로 변환에 의한 피해의 판정이나 규제는 무리가 많다고 생각되었다.

3.2.3 FFT를 이용한 발파진동의 변환

진동속도를 진동레벨로 변환하기 위하여 IMSL Library의 QDDER⁽⁶⁾ 함수를 이용하여 가속도로 변환하고 푸리에 변환을 하여서 각 주파수별 진동가속도를 구하고 감각 보정회로를 이용하여 보정한 후 진동레벨을 구하였다. FFT 변환은 나주 송현동의 계측 데이터를 이

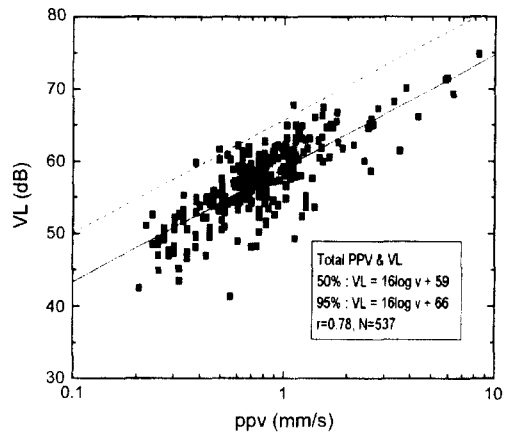


Fig. 6. Relationship between peak particle velocity and vibration level.

용하였다. Table 1은 변환시킨 결과를 나타낸 표이고, Fig. 7은 변환하는 과정을 보여주는 그림이다.

진동속도를 푸리에 변환시켜서 진동레벨로 변환한 결과, 실제 계측치와의 차이가 0.3~0.9 dB, 평균 5.3 dB 인 진동레벨을 얻을 수 있었다. 계측기의 resolution이 0.127 mm/s로 높기 때문에 변환이 가능하였다.

3.2.4 발파진동 변환 고찰

이상과 같이 진동속도를 진동레벨로 변환한 결과 기존의 변환식과 충격진동 데이터로만 재구성한 변환식은 상관계수는 높았지만 진동레벨이 과대 평가되는 단점이 있었고, 푸리에 변환을 이용한 결과는 진동속도를 진동가속도로 변환하는 과정에서 미분 방법에 따라 차이가 많이 발생하는 문제가 있었다. 그러므로 세 가지 방법을 이용한 변환은 모두 오차가 있으므로 변환에 의한

Table 1. Transformation of vibration velocity by FFT.

No.	PPV Vertical (mm/s)	Vibration Level dB(V)		Error (dB)
		Measured	Transformed	
1	0.254	48.5	53.0	4.5
2	0.572	50.9	59.5	8.6
3	0.191	42.4	46.2	3.8
4	0.381	47.4	54.3	6.9
5	0.381	46.9	53.0	6.1
6	0.254	49.2	53.3	4.1
7	0.318	48.5	53.8	5.3
8	1.080	57.6	65.6	8.0
9	2.540	67.3	71.7	4.4
10	1.020	54.8	62.0	7.2
11	3.430	68.2	77.1	8.9
12	3.810	70.1	76.3	6.2
13	0.826	57.0	59.6	2.6
14	0.699	55.9	56.2	0.3
15	0.889	57.1	57.8	0.7
16	0.445	50.4	57.2	6.8
17	0.445	50.8	60.1	9.3
18	0.699	54.4	57.8	3.4
19	0.572	54.4	58.7	4.3

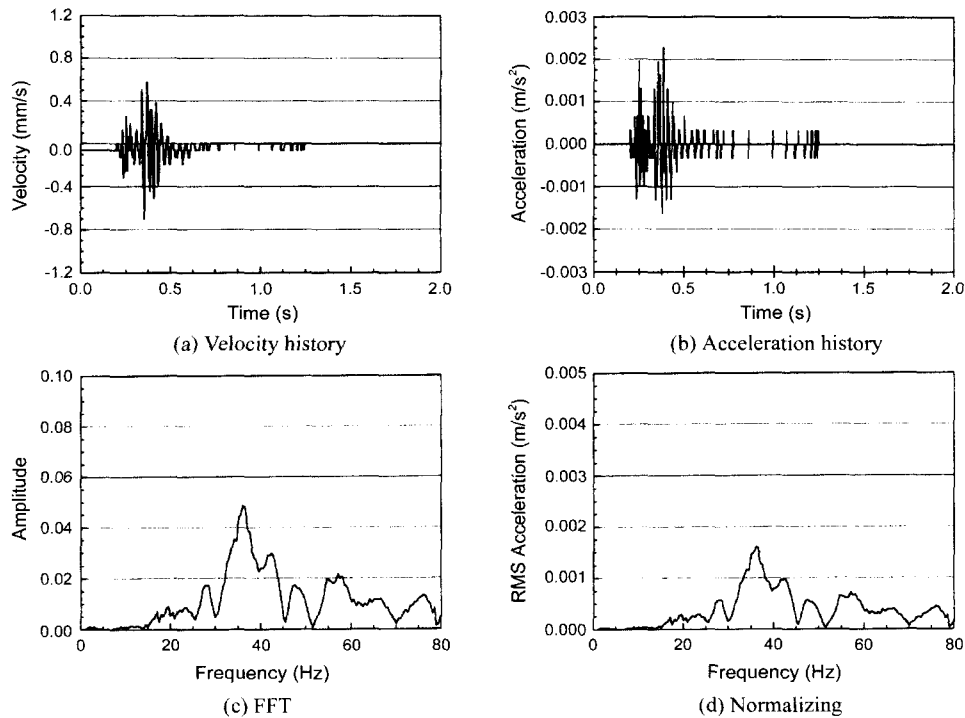
피해 보상의 관점에는 무리가 있으나, 그 중에서 동시에 측정된 진동속도와 진동레벨의 변환식이 별도로 진동레벨을 계측하지 않아도 최고 수준을 예측할 수 있어서 안전율이 높으므로 실용적으로 가장 적당한 방법이라 생각된다.

4. 결 과

본 연구에서는 발파진동을 계측하여 예측방법의 타당성을 검토하였고 환경규제 기준으로의 변환 방식을 규명하였다. 중요한 결과는 다음과 같다.

1) 발파진동은 진동레벨을 이용하는 것보다는 진동속도를 이용하여 설계하는 것이 신뢰도가 더 높았다. 따라서 설계나 시공은 진동속도로 관리하고 이를 진동레벨로 변환할 필요성이 있었다.

2) 진동속도를 진동레벨로 변환한 결과 오차가 있으므로 변환에 의한 피해 보상의 관점에는 무리가 있으나, 동시에 측정된 진동속도와 진동레벨의 변환식이 별도로 진동레벨을 계측하지 않아도 최고 수준을 예측할 수 있어서 안전율이 높아 실용적으로 가장 적당한 방법이었다.

**Fig. 7.** An example of transformation procedure.

3) 소음·진동 규제 기준은 신뢰성이 더 높은 진동속도를 병용하여 인체에 대한 피해 기준으로 진동레벨을 구조물에 대한 피해 기준으로 진동속도를 규제 항목으로 할 필요가 있었다.

참고문헌

1. Duval, W.I., Fogelson, D.E., 1962, Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations, USBM RI 5968. 19.
2. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. & Dowding C.H., 1980, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mining, USBM RI 8507.
3. DIN 4150 Teil 2, 1992, Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
4. DIN 4150 Teil 3, 1992, Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
5. ISO 2631-2, 1989, Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-Part 2 : Continuous and Shock-induced Vibration in Buildings(1 to 80 Hz).
6. Visual Numerics, 1997, IMSL Math/Library, Visual Numerics Inc., Vol. 1, 516-518.



김 남 수

1994년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1996년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1999년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학박사
 Tel : 062-530-0824
 E-mail : nskim@chonnam.ac.kr
 현재 전남대학교 자원공학과 강사



양 형 식

1979년 서울대학교 자원공학과, 공학사
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사
 Tel : 062-530-1724
 E-mail : hsyang@chonnam.ac.kr
 현재 전남대학교 자원공학과 교수