

# 신뢰성 지수를 이용한 교량 구조물의 건설진동 예측에 관한 연구

## A Study on the Construction Vibrations Prediction of

## Bridge Structures using the Reliability Index

박연수\* · 우정하\*\* · 전양배\*\*\* · 김용록\*\*\*\* · 김동현\*\*\*\*\*

Park Yeon Soo, Woo Jung Ha, Jeon Yang Bae, Kim Yeung Rok and Kim Dong Hyur

Key Words : Reliability Index (신뢰성 지수), Reliability (신뢰도), Scaled Distance (환산거리), Construction Vibration (건설진동), Assumption equations (추정식), Regression analysis(회귀분석)

### ABSTRACT

This study presents a new analysis of blast vibration equations of a bridge structures using a reliability index. Changing the reliability makes each blast vibration equation. The blast equations are divided into three classes, having 50%, 90% and 99.9% at  $\beta=0, 1.28$  and 3 respectively. In the result of this research, the assumption equations which used  $\beta=1.28$  is suitable. By using these blast equations, it is possible for users to predict reliable ground vibration values upon demand.

### 기호설명

- W : 장약량
- D : 폭원으로부터의 거리
- SD : 환산거리
- $\beta$  : 신뢰성 지수

등을 예측하여 그에 따른 경감대책을 수립, 발파진동에 대한 피해가 주변보안건물에 대해 미치지 않고, 효과적인 공사가 수행될 수 있도록 효율적인 공사를 위한 사항들을 예측하는 데 그 중점을 두었다.

그 동안 국내의 각종 건설, 진동관련 기준은 대체로 외국의 기준을 변형, 적용하였다. 이러한 이유로 해당 기관마다 적용 기준치가 상이하여 상당한 혼란을 초래하였고 1999년 건설교통부에서 제정한 '터널표준시방서'에서는 각 대상에 따라 명확한 적용 기준을 설정하였으나 현실적으로 이는 구조물에 대한 사항으로 인체에 대해서는 그리 유효하지 못하다.

## 1. 서론

우리나라는 지형적으로 산지와 구릉지가 발달되어 전 국토 면적의 70%이상을 점하고 있어, 국토확장, 고속도로건설, 고속철도건설, 지하철공사등 대형 국책사업과 도심지 내 아파트, 고층 건물신축 등 부지조성 공사에 불가피하게 암반굴착을 위한 발파작업이 증대되고 있는 실정이다.

현장 발파로 인한 지반진동 및 폭음이 주변지역에 미치는 영향

본 연구는 발파로 인한 지반의 진동치를 신뢰도에 따라 추정할 수 있는 진동 추정식을 기존의 자료를 분석하여 제시하는데 있다.

시험발파 진동측정과 신뢰성 이론을 이용한 분석을 통해서 얻은 발파진동으로 진동 예상식을 산정하여 본발파 진동측정과 비교하고, 적절한 방진 대책을 수립할 수 있도록 건설진동예측을 하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 발파진동

#### (1) 발파진동식

발파 진동식은 이론적 전개가 완전히 이루어지지 않고 있지만,

\* 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수  
E-mail : parkys@chonnam.ac.kr  
Tel : (062)530-1657, Fax : (062) 530-1650

\*\* 전남대학교 대학원 토목공학과

\*\*\* 익산지방 국토관리청

\*\*\*\* 송원대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\*\* 전남대학교 대학원 토목공학과

많은 연구자들은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 많은 발파진동의 측정경험을 토대로, 구조를 피해의 기준이 되는 지반의 최대 진동속도를 지발당 장약량(W)과 폭원으로부터의 거리(D)를 주요변수로 하여 설명하고 있다. 발파진동식에서 사용되는 환산거리(Scaled Distance ; SD)는 지발당 장약량과 거리가 변화할 때 지반의 최대입자속도를 예측하는데 필요하다. 가장 보편적인 두 가지 환산거리는 자승근 환산거리  $D/W^{1/2}$ 와 입방근 환산거리  $D/W^{1/3}$ 이다. 입방근 환산거리의 유도과정은 무차원 변수를 갖는 입방근 환산거리의 연구는 핵폭발의 축척 모형과 관련하여 수년동안 이용되어 왔으며 Hendron에 의해 발파진동에 도입된 바 있다.

Hendron은 발파진동을 조절하는데 다음의 표에 제시된 변수들이 중요한 의미를 갖는 것으로 생각했다.

Table 2.1 발파현상에 대한 차원해석의 변수

변 수	부 호	차 원
독립변수		
발파이완에너지(지발당)	$W$	$Fl$
폭원(범위)으로부터의 거리	$D$	$l$
암반의 탄성파 속도	$c$	$lt^{-1}$
암반밀도	$\rho$	$Ft^2l^{-4}$
시간	$t$	$lt$
종속변수		
최대 지반 변위	$u$	$l$
최대 지반 입자속도	$\dot{u}$	$lt^{-1}$
최대 지반 가속도	$\ddot{u}$	$lt^{-2}$
지반운동의 진동수	$f$	$t^{-1}$

Buckingham Pi 무차원 해석이론에 의하면 발파현상과 관련된 되는 6개의 독립변수와 무차원 변수가 있고 이들 변수는  $u/D$ ,  $\dot{u}/c$ ,  $\ddot{u}D/c^2$ ,  $ft$ ,  $tc/D$  및  $W/\rho c^2 D^3$ 이다. 처음 4개는 종속변수이고 나중 2개는 독립변수들이 조합된 것이다. 또 Pi 이론에 의하면 앞의 변수들은 어떤 척승을 하거나 서로 곱해질 수 있고 하나의 무차원 변수는 다른 무차원 변수의 함수일 수 있다. 암반의 밀도  $\rho$ 는 일반적으로 20%이상 변하지 않고 탄성파 속도  $c$ 도 두배 이상으로 변하지 않으므로  $W$ 나  $D$ 의 변화는 가나  $c$  보다 더 중요한 뜻을 가진다.  $\rho$ 나  $c$ 의 변화를 무시하면  $u/D$ ,  $W/\rho c^2 D^3$ ,  $\dot{u}/c$ 는  $u/D$ ,  $W/D^3$ , 및  $\dot{u}$ 로 된다. 더이상 무차원은 아니지만  $\rho$ 나  $c$ 가 대체로 일정하면 이들은 서로 비교될 수 있다. 기존의 연구에 의하면 지반의 최대 입자속도는 단당 최대 장약량(W), 즉 정해진 시간 간격내에 폭발하는 폭약의 양과 밀접한 관계가 있다. 여기서 최대 장약량은 8ms 내에 폭발하는 장약량(W)으로 간

주하는 것이 관례이다. 그러나 매질의 전파속도, 장약간의 거리, 기폭 진행방향과 같이 다른 인자와 함께 구조적으로 파가 강화되어 유효 장약량을 변화시킬 가능성도 있다.

이러한 이유로 Hendron은 광범위하게 발파진동을 측정하여 환산거리  $D/W^{1/3}$ 에 따른 진동 속도를 분석하였다.

분석 결과 장약량이 14-145,000kg 까지 변화하는 큰 편차임에도 불구하고 최대 진동 속도들은 환산거리  $D/W^{1/3}$ 과 일정한 관계를 보였다. 위와 같은 과정을 통해 발파진동식은 다음과 같은 형태로 제안 되었다. 여기에서 사용되는 단위인 kine은 진동속도에 대한 단위로서 cm/s와 동일하다.

$$V=K(D/W^m)^n \quad (2.1)$$

여기에서,

- V : 지반의 진동속도(kine)
- D : 발파원으로부터 대상지점까지의 거리(m)
- W : 지발당 장약량(kg)
- K : 발파상수
- m : 장약지수
- n : 감쇠지수

식(2.1)는 일반적으로  $V=K(SD)^n$ 의 형태로도 쓰이는데 "SD"는 환산거리(Scaled Distance : SD)로 정의된다.

"SD=(D/W<sup>m</sup>)"으로서 "m/kg<sup>m</sup>"의 단위를 갖는다. 본 연구의 경우 장약지수 m은 1/3을 사용할 때 가장 적은 편차로 회귀선에 접근하므로, 이 값을 사용하여 발파진동의 일반식을 유도하고 진동특성을 분석하였다.

## (2) 발파진동 허용 기준

가) 건물 및 구조물에 대한 발파진동 허용한계 검토

### ◆ 발파진동 허용한계

(가) 진동속도 1 cm/sec

- 사람은 진동을 심하게 느끼는 반면 건물이나 일반적인 시설물에 발생 하는 피해는 적다.

(나) 진동속도 5 cm/sec

- 상태가 불량한 주택이나 구조적으로 취약한 건물에서는 극히 가벼운 피해가 발생하는 수준이지만 정상적인 건물에서는 안전한계로 판단할 수 있다.

(다) 진동속도 7 cm/sec

- 내진건물이나 견고한 지반에 놓인 콘크리트 구조물에서의 안전한계로 평가할 수 있다.

Table 2.2 발파진동 허용 기준치

< 단위 : cm/sec >

구분	진동속도에 따른 규제 기준	
	건물종류	허용 진동치
서울시 지하철 시방기준	문화재, 정밀기기 설치건물	0.2
	주택, 아파트	0.5
	상가, 사무실, 공공건물	1.0
	RC, 철골조 공장	4.0
노동부 (노동부고시 94-26호)	문화재, 컴퓨터 등 정밀기기	0.2
	결함 또는 균열이 있는 건물	0.5
	균열이 있고 결함없는 빌딩	1.0
	회벽이 없는 공업용 콘크리트 구조물	1.0 - 4.0
한국토지공사 시방기준	가축 (소, 닭, 돼지 등)	0.09
	문화재, 진동예민 시설물	0.2
	주택, 아파트	0.5
	상가건물	1.0
	철근 콘크리트 건물	1.0 - 4.0
건교부 터널설계기준 (1999)	진동예민 구조물(문화재등)	0.3
	조적식벽체와 목재 천장구조물 (재래가옥등)	1.0
	조적식 중층형건축물(저층양옥, 연립주택등)	2.0
	철근콘크리트 중층형건축물(중, 저층 아파트 등)	3.0
	철근콘크리트 대형건축물(고층아파트등)	5.0

## 2.2 신뢰성 지수

### (1) 신뢰성 지수

기존의 허용 용력설계법에서의 안전율은 하중과 재료강도에 불확실성이 포함되지 않는다고 보고, 여러 가지 불확실성 요인이 남는 것을 고려해서 경험과 판단에 의하여 안전율이 정해진 것이다. 그러나, 하중과 재료의 강도는 실제로 어떤 형태의 분포를 가진 확률량이다. 즉 그 값들이 어떤 범위를 가지고 변동하는 것이다. 이러한 변동을 고려하여 확률론적으로 구조물의 안전성을 평가해야 옳을 것이다.

최근에는 구조물 설계를 위해 사용되는 기존의 허용 용력 설계개념이나 공칭 안전을 설계 개념보다 한 단계 더 발전된 설계 개념으로 신뢰성이론을 사용한 새로운 설계 규준이 사용되고 있다.

이는 신뢰성지수(reliability index ;  $\beta$ )를 구조물 혹은 구조물의 모든 시스템에 대해 일정한 값으로 선택함으로써 강도와 하중의 가변성에 상관없이 요구되는 신뢰도(reliability ; Pr) 혹은 파괴확률을 갖도록 하는 것이다.

이는 설계 시 포함될 수 있는 기존의 불확실량들을 통계적인 추정에 기초한 확률모형, 즉 신뢰성 이론(reliability theory)에 의해 신뢰도 또는 신뢰성지수( $\beta$ )를 척도로 하여 해석하기 위한이다. 신뢰성지수( $\beta$ )는 다음과 같이 정의된다.

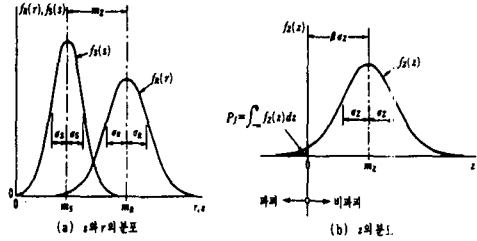


Fig 2.1 신뢰성지수( $\beta$ )

저항 R과 하중작용(load action) S를 비교하여 저항 R이 하중 작용 S보다 클 때 구조물은 안전하다. 그리고 양자의 차이( $Z = R - S$ )를 안전영역 혹은 안전여유(safety margin)라 부르고  $R = S$ , 즉  $Z = 0$ 을 한계점이라 칭한다. 하중의 작용 S와 저항 R이 서로 독립되는 것으로 하면 그림 2.1(a)에 표시한 것처럼 각각의 중앙값  $m_S$ 와  $m_R$ , 표준편차  $\sigma_S$ 와  $\sigma_R$  및 확률밀도함수  $f_S(s)$ 와  $f_R(r)$ 도 또한 독립이다. 여기에서 S 및 R은 불확실성을 가지는 파라미터(parameter)의 함수이므로 안전영역 Z는 그림 2.1(b)에서 표시한 것처럼 어느 확률밀도함수  $f_Z(z)$ 로 분포된다. 그림 2.1의 평균값  $m_Z = m_R - m_S$ , 표준편차  $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ , 파괴확률  $P_f$ 는  $z \leq 0$ 의 범위에 대한 확률밀도함수  $f_Z(z)$ 가 둘러싼 면적으로서 주어진다.

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz \quad (2.2)$$

여기에서 안전영역 Z가 표준정규분포를 한다면 파괴확률은 다음과 같이 된다.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2.3)$$

여기서  $\Phi$ 는 표준정규분포함수이며 다음과 같다.

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.5)$$

여기에서  $\beta$  : 신뢰성 지수

$m_R, \sigma_R$  : 구조물 진동규준(저항분포의

중앙값)치와 표준편차

$m_S, \sigma_S$  : 지반진동(하중작용)분포의

중앙값과 표준편차

중앙값  $m_Z = \beta \sigma_Z$ 이며 파괴확률  $P_f$ 는 함수  $f_Z(z)$ 의 특성값으로 파악할 수 있다. 즉  $\beta$ 의 값이 같으면 신뢰성도 같다. 이와 같은  $\beta$ 를 신뢰성지수라 부르며 위의 식 (2.5)과 같이 정

의된다. 본 연구에서는 실측한 진동측정치의 분포를 가우스의 정규분포로 가정하였다.

이와 같은 신뢰성이론을 기초로 하여 건설진동(발파진동)을 하중작용 S로, 구조물이 하중작용에 대해 저항하는 정도를 R로 고려하여 평가하였다. 어느 공사 현장에서 공사 도중 발생하게 되는 진동으로 인한 하중의 작용(지반진동) S는 위의 일반적인 분포형태처럼 정규분포의 형태로 가정할 수 있다.

현재 구조물의 저항능력 R은 진동 표준치로 규정할 수 있다. 진동 표준치는 매설가스관이나 공사현장의 주요 대상구조물의 종류에 따라 하나의 상수값으로 규정되어 있어 구조물의 저항 R을 나타내는 분포는 표준편차  $\sigma_R \approx 0$ 을 갖는 정규분포로 고려해 볼 수 있다.

또한  $f_z(z)$ 함수는  $\beta\sigma_z \approx \beta\sigma_s$ 가 되는 분포특성을 갖게 된다. 이런 상태를 S와 R, 그리고 Z로 나타내 보면 다음 그림 2.2과 같은 분포형상을 나타내게 된다. 즉  $\phi(\beta)$ 를 하중작용의 정규분포 함수만으로 평가할 수 있게 된다.

이와 같이 안전성 상태, 사용한계 상태, 극한한계 상태에 요구 되는 신뢰도(혹은 반대의 개념에서 파괴확률)를 만족하는 신뢰성지수( $\beta$ )를 각각 3, 1.28, 0으로 선택하여 사용하였다.

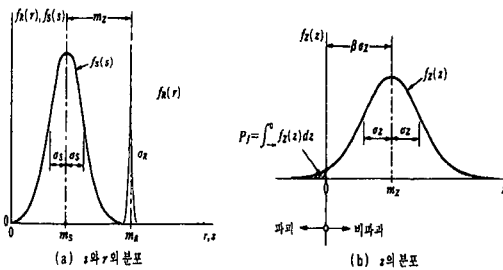


Fig 2.2 진동 표준치를 고려한 신뢰성 지수

(2) 안전성 상태, 사용한계 상태, 극한한계 상태에 대한 정의  
본 연구에서는 신뢰성지수( $\beta$ )를 3, 1.28, 0을 사용하여 3가지로 제시하였다. 각각의 신뢰성지수( $\beta$ )에 대한 진동치와 진동식은 안전성 상태( $\beta=3$ ), 사용한계 상태( $\beta=1.28$ ), 극한한계 상태( $\beta=0$ )에 해당함을 의미한다. 각각의 상태에 대한 정의는 다음과 같다.

- 안전성상태 : 강도설계법에서는 설계하중을 초과하는 하중이 구조물에 재하 될 확률을 0.1%(신뢰도 99.9%)를 목표로 하고 있다. 발파로 인한 지반진동을 구조물에 작용하는 하중의 개념으로 본다면 신뢰성지수( $\beta$ ) 3을 사용하여 제시한 진동식에 기준 하여 발파를 실시할 경우 진동기준치를 초과하는 확률이 0.1%에 해당한다. 즉 발생되는 모든 지반 진동치를 포함하는 진동추정식이라 할 수 있다.

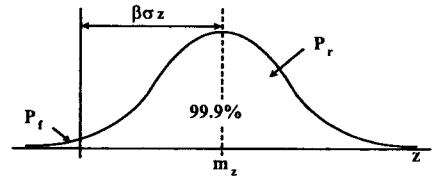


Fig 2.3 안전성 상태

- 사용한계상태 : 한계상태 설계법(BS8110)에서는 설계 시에 포함되는 변동 요인들을 적절히 고려하기 위한 개념에서 강도의 시험치가 특성강도(characteristic strength)에 미치지 못할 확률 5%, 특성하중(characteristic load)보다 큰 하중이 작용할 확률 5%를 각각 사용하고 있다. 본 연구에서는 위의 두 가지 변동요인을 규합하여 불확실량 10%를 목표로 규정한 상태를 사용한계 상태로 정의하고 이에 해당하는 신뢰성지수( $\beta$ )를 선택하였다. 이러한 구조설계시의 사용한계상태 개념을 도입하여 사용한계상태의 신뢰성지수( $\beta$ )를 1.28로 제시하였으며 여기에 해당하는 신뢰도는 90%를 갖게 된다.

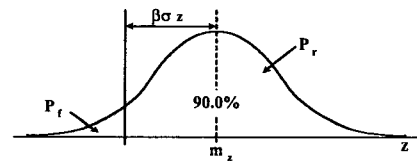


Fig 2.4 사용 한계 상태

특성강도와 특성하중에 대한 설명은 간략히 다음에 정리하였다. 구조물 설계 시에 포함되는 변동요인 가운데는 조사, 시험에 의해 그 변동을 추정할 수 있는 것과 추정이 곤란한 것으로 나누어 생각한다.

일반적으로 조사, 시험에 의해 추정이 가능한 것들은 어느 정도까지 합리적인 형태로 설계에 고려할 수가 있어서, 한계상태 설계법에서는 그 위험측의 영향을 특성치(characteristic value)를 설정함으로써 배제하고 있다. 조사와 시험으로 추정이 곤란한 변동으로 인한 위험측의 영향은 부분안전계수(partial safety factor)를 사용함으로써 배제하고 있다.

재료의 평균강도  $f_m$  보다 적절히 작은 강도  $f_k$ 를 설계에 사용해야만 안전하고 경제적인 구조물을 얻을 수 있는 개념에서 BS8110에서는 강도의 시험치가  $f_k$ 이하로 되는 확률을 최대 5%로 하고 있다. 이  $f_k$ 를 재료의 특성강도(characteristic strength), 또는 재료강도의 특성치라고 한다.

구조물의 설계에 사용할 하중은, 그 구조물의 수명 동안에 작용할 하중들의 평균치와 표준편차로부터 결정한다. 변동하는 동적 재하중의 분포에서 평균치를  $f_m$ 이라고 하면 하중 크기의 증가 위험 측으로 될 경우의 하중  $f_k$ 를 BS8110에서는  $f_k$ 보다 큰 하중이 작용할 확률을 5%로 규정하고 있다. 이러한 하중  $f_k$ 를 특성하중(characteristic load)또는 하중의 특성치라고 한다.

- 극한한계상태 : 진동측정치 2회 중 1회가 진동추정식에

의한 진동치를 초과하는 신뢰도 50%의 확률을 갖는 상태를 의미한다. 따라서 단순히 진동측정치들을 회귀분석하여 얻은 기존의 대부분의 진동추정식이 신뢰성지수( $\beta$ )가 0인 경우에 해당한다.

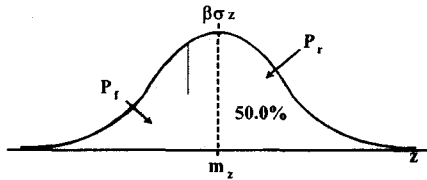


Fig 2.5 극한 한계 상태

### 3. 발파진동 측정치 분석

#### 3.1 〇〇대교의 진동측정 및 분석

##### (1) 시험발파

◆시험발파 일시 : 2002년 6월 12일

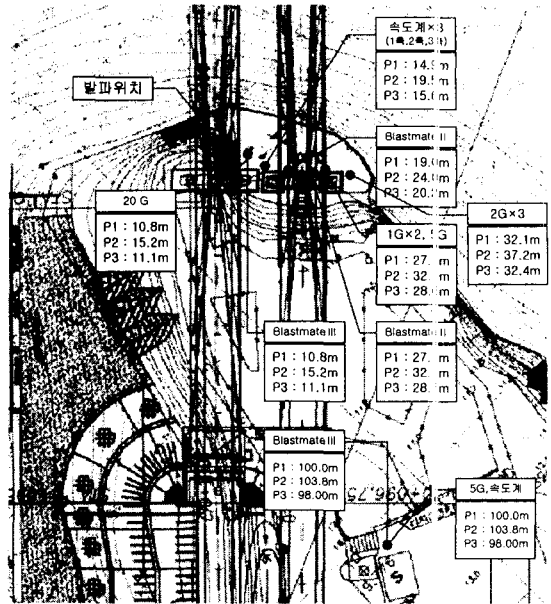
◆시험발파 내용 :

구분	단위	Pattern "A"	Pattern "B"	Pattern "C"	비고
천공경	mm	50	50	50	
천공장	m	1.0	1.5	2.7	
천공간격	m	0.6	0.8	1.2	
최소저항선	m	0.6	0.7	1.0	
공당장약량	kg/hole	0.25	0.5	1.0	
지발당최대 장약량	kg/delays	0.25	0.5	1.0	
사용뇌관		비전기 뇌관	비전기 뇌관	비전기 뇌관	
1회 발파당 발파공수	holes/blast	10	10	10	

◆사용 폭약량 : 17.5 kg

◆사용 뇌관수 : 30 개

##### (2) 측정위치



#### 3.2 측정결과

##### (1) 시험발파 측정결과(2002년 6월 12일)

발파 패턴	계측기종	거리		지발당 장약량 (kg/delays)	방향 진동속도 (kine)		
		이격(m)	환산(m)		연직	교축	교축직각
A	7969	10.8	17.14	0.25	0.294	0.437	0.359
	속도계	14.9	23.65	0.25	0.217	0.2111	0.2068
	4047	15	23.81	0.25	0.165	0.165	0.171
	3077	19	30.16	0.25	0.117	0.0429	0.0635
	2403	27.1	43.02	0.25	0.102	0.0524	0.0572
	7960	100	158.74	0.25	-	-	-
B	7959	15.2	19.15	0.50	0.422	0.344	0.335
	속도계	19.5	24.57	0.50	0.2581	0.3319	0.2088
	4047	19.6	24.69	0.50	0.121	0.165	0.108
	3077	24	30.23	0.50	0.2	0.0984	0.0953
	2403	32.1	40.44	0.50	0.984	0.0619	0.0619
7960	103.8	130.78	0.50	0.0079	0.0317	0.0159	
C	7959	11.1	11.1	1.00	1.27	1.82	1.04
	속도계	15.6	15.6	1.00	0.5163	0.6069	0.2088
	4047	15.8	15.8	1.00	0.375	0.603	0.483
	3077	20.2	20.2	1.00	0.708	0.289	0.364
	2403	28.6	28.6	1.00	0.370	0.254	0.214
	7960	98	98	1.00	0.0524	0.0476	0.0302

##### (2) 본발파 측정결과(2002년 6월 20일)

발파 패턴	계측기종	거 리		지발당 장약량 (kg/delays)	방향 진동속도 (kine)		
		이격(m)	환산(m)		연직	교축	교축직각
A	7959	10.8	17.14	0.25	0.294	0.437	0.359
	속도계	14.9	23.65	0.25	0.217	0.2111	0.2068
	4047	15	23.81	0.25	0.165	0.165	0.171
	3077	19	30.16	0.25	0.117	0.0429	0.0635
	2403	27.1	43.02	0.25	0.102	0.0524	0.0572
	7960	100	158.74	0.25	-	-	-
B	7959	15.2	19.15	0.50	0.422	0.344	0.335
	속도계	19.5	24.57	0.50	0.2581	0.3319	0.2088
	4047	19.6	24.69	0.50	0.121	0.165	0.108
	3077	24	30.23	0.50	0.2	0.0984	0.0953
	2403	32.1	40.44	0.50	0.984	0.0619	0.0619
	7960	103.8	130.78	0.50	0.0079	0.0317	0.0159
C	7959	11.1	11.1	1.00	1.27	1.82	1.04
	속도계	15.6	15.6	1.00	0.5163	0.6069	0.2088
	4047	15.8	15.8	1.00	0.375	0.603	0.483
	3077	20.2	20.2	1.00	0.708	0.289	0.364
	2403	28.6	28.6	1.00	0.370	0.254	0.214
	7960	98	98	1.00	0.0524	0.0476	0.0302

## 4. 신뢰성 지수를 이용한 발파진동식

### 4.1 신뢰성 지수를 이용한 진동추정식

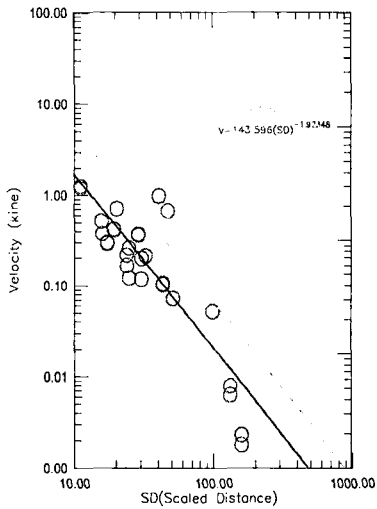


Fig 4.1 신뢰도를 고려한 연직방향 지반 진동 추정식 산정을 위한 회귀분석

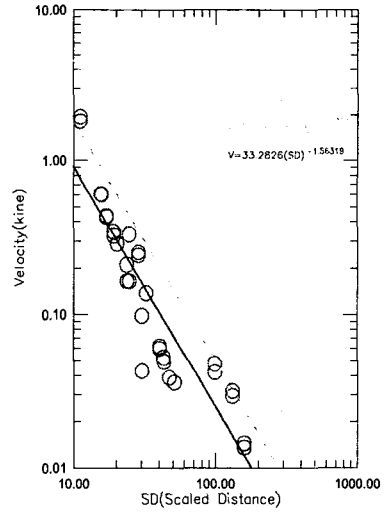


Fig 4.2 신뢰도를 고려한 교축방향 지반 진동 추정식 산정을 위한 회귀분석

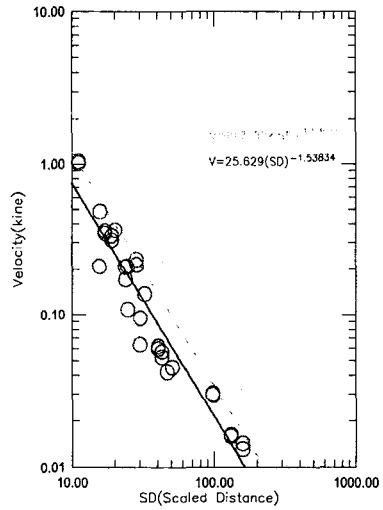


Fig 4.3 신뢰도를 고려한 교축직각방향 지반 진동 추정식 산정을 위한 회귀분석

### 4.2 비교분석

#### (1) 진동추정식 분석

구분	극한한계상태	사용한계상태	안전성상태
신뢰성 지수( $\beta$ )	0	1.28	3
신뢰도 (Pr)	50%	90%	99.9%

■ 연직방향

$\beta=0, V=143.596(D/W^{1/3})^{-1.92348}$

$\beta=1.28, V=464.89142(D/W^{1/3})^{-1.92348}$

$\beta=3.0, V=2253.9356(D/W^{1/3})^{-1.92348}$

■ 교축방향

$\beta=0, V=33.2826(D/W^{1/3})^{-1.56319}$

$\beta=1.28, V=66.38728(D/W^{1/3})^{-1.56319}$

$\beta=3.0, V=167.89384(D/W^{1/3})^{-1.56319}$

■ 교축직각방향

$\beta=0, V=25.629(D/W^{1/3})^{-1.53834}$

$\beta=1.28, V=40.71322(D/W^{1/3})^{-1.53834}$

$\beta=3.0, V=75.829279(D/W^{1/3})^{-1.53834}$

(2) 진동추정식 해석

방향	이격거리 (m)	환산거리 (m)	본발파측정값 (kine)	진동추정식(kine)		
				$\beta=0$	$\beta=1.28$	$\beta=3$
연직 방향	18.1	15.81181	0.549	0.709456	2.2968595	11.135876
	19.4	16.94746	0.452	0.620846	2.0099876	9.7450339
	21.5	18.78198	0.5149	0.595777	1.649436	7.9969096
	21.8	19.04405	0.703	0.483777	1.6060538	7.7866393
	22.5	19.65556	0.41	0.466820	1.5113261	7.3273707
	22.8	19.74292	0.5149	0.463722	1.4984893	7.2651337
	23.9	20.87857	0.546	0.412279	1.3456544	6.5241435
	25.2	22.01422	0.5149	0.372222	1.2153142	5.8922146
	25.9	22.62573	0.509	0.351277	1.1529236	5.5897257
	27.3	23.84874	0.5149	0.321277	1.0418959	5.0514293
	74	64.64495	0.0317	0.047273	0.1530469	0.7420179
	75.6	66.04268	0.027	0.045368	0.1468775	0.7121068
	76.8	67.09097	0.0333	0.044014	0.142495	0.6908594
	78.3	68.40135	0.0238	0.042406	0.1372908	0.6656276

방향	이격거리 (m)	환산거리 (m)	본발파측정값 (kine)	진동추정식(kine)		
				$\beta=0$	$\beta=1.28$	$\beta=3$
교축 방향	18.1	15.81181	0.364	0.444612	0.8868473	2.2428423
	19.4	16.94746	0.443	0.352277	0.795721	2.0123833
	21.5	18.78198	0.3256	0.339717	0.6776183	1.7137007
	21.8	19.04405	0.471	0.312277	0.6630983	1.6769797
	22.5	19.65556	0.34	0.311277	0.6311337	1.5961411
	22.8	19.74292	0.2453	0.314227	0.6267737	1.5851145
	23.9	20.87857	0.343	0.212277	0.574304	1.4524184
	25.2	22.01422	0.2752	0.212277	0.5286698	1.3370092
	25.9	22.62573	0.3262	0.212277	0.5065049	1.280954
	27.3	23.84874	0.2451	0.212277	0.4664925	1.1797624
	74	64.64495	0.0683	0.0981466	0.0981466	0.2482134
	75.6	66.04268	0.0524	0.094919	0.094919	0.2400507
	76.8	67.09097	0.0119	0.046430	0.0926108	0.2342134
	78.3	68.40135	0.0667	0.0698525	0.0698525	0.2272375

방향	이격거리 (m)	환산거리 (m)	본발파측정값 (kine)	진동추정식(kine)		
				$\beta=0$	$\beta=1.28$	$\beta=3$
교축 직각 방향	18.1	15.81181	0.327	0.366683	0.5824976	1.0849147
	19.4	16.94746	0.308	0.329572	0.5235458	0.9751157
	21.5	18.78198	0.2148	0.281374	0.4469801	0.8325103
	21.8	19.04405	0.375	0.275440	0.4375528	0.8149519
	22.5	19.65556	0.275	0.252369	0.4167879	0.7762767
	22.8	19.74292	0.2148	0.260584	0.4139542	0.7709989
	23.9	20.87857	0.346	0.226102	0.379828	0.7074381
	25.2	22.01422	0.2148	0.220393	0.3501074	0.6520828
	25.9	22.62573	0.2148	0.211277	0.3356573	0.6251692
	27.3	23.84874	0.2148	0.194373	0.3095461	0.5765364
	74	64.64495	0.0108	0.042026	0.0667602	0.1243424
	75.6	66.04268	0.0608	0.040975	0.0645991	0.1203172
	76.8	67.09097	0.0124	0.039692	0.0630529	0.1174374
	78.3	68.40135	0.0608	0.038528	0.0612043	0.1139944

신뢰성 지수  $\beta=0$  추정된 식의 예측값은 본발파의 측정값이 예측값 보다 다소 크게 발생하였다. 그러나  $\beta=1.28$ 로 추정된 식은 본발파 측정값을 모두 만족하며 적합한 식으로 평가되며  $\beta=3.0$ 로 추정된 식은 과대평가한식으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 발파로 인하여 지반의 진동을 추정하기 위해 현재 널리 사용되고 있는 발파진동식 산정방법 보다 더 합리적이고 신뢰도를 갖는 새로운 발파진동식 산정 방법인 신뢰성 지수( $\beta$ )를 사용하여 새롭게 제안하였다.

또한 본 연구에서 제안된 발파진동식 산정 방법을 사용하여 기존의 발파진동 측정 자료를 재분석한 후 신뢰도 정도에 따라 발파진동식을 제시하여 건설진동에 관한 안전성을 판단하고 예측하고자 하였다.

“신뢰성 지수를 이용한 교량 구조물의 건설진동 예측에 관한 연구” 결과는 다음과 같다.

본 연구에서 사용된 교량구조물 ○○대교 본발파 측정결과 신뢰성 지수  $\beta=0$  추정된 식의 예측결과는 본발파 측정값이 예측결과값 보다 다소 초과하여 발생하였다. 그러나  $\beta=1.28$ 로 추정된 식은 본발파 측정값을 모두 만족하며 적합한 식으로 평가되며  $\beta=3.0$ 로 추정된 식은 과대평가한식으로 판단되었다. 또한 본 연구의 교량구조물에서 제안된 발파진동식은 신뢰성지수( $\beta$ )를 사용하여 극한한계 상태( $\beta=0$ ), 사면한계 상태( $\beta=1.28$ ), 안전성 상태( $\beta=3$ )로 구분되어 있으며, 각각의 신뢰성 지수( $\beta$ )에는 50%, 90%, 99.9%의 신뢰도가 부여되었다. 이는 기존의 50%에 해당하는 발파진동식 만이 제시되었던 것에 비해 사용자가 신뢰도 정도에 따라 발파진동식을 선택하여 사용할 수 있도록 한 것이다.

발파진동에 대한 교량구조물의 안전성을 평가하기 위하여 반드시 선행되어야 할 지반의 진동 추정을 위해 신뢰성이론을

도입하여 발파진동식을 제안하였다. 제시된 발파진동식은, 본 연구대상의 발파조건 및 암반조건과 유사한 공사현장에서 시험 발파를 위한 발파진동식으로서 건설진동에 관한 영향을 미리 예측하고 판단할 수 있음을 제시하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 박연수, 이두영, 전준수, “건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구(I,II)”, (주)대우엔지니어링기술연구소, 1989.
2. 박연수, 박선준, “발파진동에 대한 구조물의 영향평가 및 대책”, 한국강구조학회지, 제8권, 제4호, pp. 22-27, 1996
3. 박연수, 박선준, 강성후, “실험적 방법에 의한 발파진동레벨의 측정 및 영향평가”, 전남대학교 공업기술연구소 공업기술연구지, pp.107-116, 1996.
4. 박연수, 박선준, 강성후, “신뢰성지수( $\beta$ )를 이용한 발파진동식 제안”, 대한토목학회 학술발표회 논문집( I ), pp. 467-470, 1997.
5. 박연수, 박선준, 강성후, “신뢰성지수를 이용한 효율적인 발파설계”, 한국소음·진동공학회 논문집, 제8권, 제5호, pp.821-831, 1998.
6. 박연수, 박선준, 강성후, “발파진동 추정식의 신뢰성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제 I -1호, pp.143-152, 1998.
7. 박연수, 박선준, 장용채, “발파형태에 따른 발파진동 추정식의 비교”, 전남대학교 공업기술연구소 공업기술연구지, 제40집, pp.103-112, 1998.
8. 박연수 역, “구조동역학”, 구미서관, 1997.