

< 논 문 >

신뢰성지수를 이용한 효율적인 발파설계

An Efficient Blast Design using Reliability Index

박연수* · 박선준** · 강성후***

Yeon-Soo Park, Sun-Joon Park and Sung-Hoo Kang

(1998년 5월 2일 접수 : 1998년 9월 4일 심사완료)

Key Words : Reliability Index(신뢰성 지수), Ultimate Limit State(극한 한계 상태), Serviceability Limit State(사용 한계 상태), Safety State(안전성 상태), Blast Vibration(발파 진동), Allowable Charge Weight(허용 장약량)

ABSTRACT

The actual ground vibrations due to NATM and foundation blasting at Seoul(weathered rock), Pusan(weathered rock) and Youngkwang(quartz andesite) have been measured, and the data were analyzed using reliability index(β) to determinate the vibration equations and the maximum charge weight for efficient blast. These were suggested with the division of ultimate limit state($\beta=0$), serviceability limit state($\beta=1.28$) and safety state($\beta=3$), respectively. The reliability index 0 means 50% data line obtained by the least squares best-fit line. The reliability index 1.28 and 3 represent bounds below 90% and 99.9% of the data, respectively. In this study, reliability index $\beta=1.28$ with security and economy was suggested. The maximum charge weight equations for efficient blast were obtained in $W=(V_C/384.90)^{1.5151} \cdot D^3(\text{Seoul})$, $W=(V_C/579.82)^{1.4706} \cdot D^3(\text{Pusan})$, $W=(V_C/1654.01)^{1.3453} \cdot D^3(\text{Youngkwang})$, and the blast vibration equations in $V=385(\text{SD})^{-1.98}(\text{Seoul})$, $V=580(\text{SD})^{-2.04}(\text{Pusan})$, $V=1654(\text{SD})^{-2.23}(\text{Youngkwang})$, respectively. From this study, inference and analysis methods of vibration equations using reliability theory were established.

1. 서 론

최근 지하철, 도로, 항만, 부지조성, 빌딩의 지하 터파기 등의 건설공사에 수반하여 발파작업이 증가되면서 발파진동, 소음, 비산석, 폭풍압 등의 발파공해에 대한 각종 민원과 안전사고의 발생으로 공사진

행에 막대한 차질을 초래하는 경우가 있다. 발파로 인해 발생하게 되는 민원과 안전사고에 효과적으로 대처하기 위해서 발파기술의 향상 및 발파작업의 신뢰도 향상이 필요한 실정이다. 현재는 민원의 발생을 우려하여 정확한 계산 근거가 없는 상태에서 제시된 진동규준치를 임의적으로 낮춰 발파를 수행하고 있는 상태이다.

본 연구에서는 신뢰성 이론(reliability theory)을 도입하여 서울의 제동로타리-을지로 전력구 연결 NATM공사(낙원상가 부근 : 풍화암)^(1~3)와 부산 지하철 3-0 공구 NATM공사(대티터널 괴정측 부

* 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 조교수

** 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 동신대학교 공과대학 토목공학과 교수

근 : 풍화암)^(1,2,4)의 2개의 도심지 발파현장과 영광 원전 부지정지공사(석영안산암)⁽⁵⁾에서 측정된 지반 진동치들을 신뢰성 이론을 사용하여 분석·평가하고 발파시 신뢰수준을 극한한계상태(ultimate limit state), 사용한계상태(serviceability limit state), 안전성상태(safety state)로 구분하여 각각의 상태에 대한 신뢰성 지수(reliability index : β)를 제시하고자 한다. 제시한 각각의 신뢰성지수(β)에 대한 발파진동식과 허용장약량 산출식을 결정하고 가장 효율적으로 발파를 수행할 수 있는 신뢰성지수(β)를 결정하여 각 시험발파 현장에 대한 대표적인 발파진동식과 허용장약량 산출식을 제시하고자 한다.

2. 기초이론

2.1 안전성 상태, 사용 한계상태, 극한 한계상태에 대한 정의

본 연구에서는 신뢰성지수(β)를 3, 1.28, 0을 사용하여 3가지로 제시하였다. 각각의 신뢰성지수(β)에 대한 발파진동식은 안전성 상태($\beta=3$), 사용 한계상태($\beta=1.28$), 극한 한계상태($\beta=0$)를 의미한다.

안전성 상태는 99.9%의 신뢰도를 갖는 상태를 의미한다. 강도설계법에서는 설계하중을 초과하는 하중이 구조물에 재하될 확률을 0.1%(신뢰도 99.9%)를 목표로 하고 있다. 발파로 인한 지반진동을 구조물에 작용하는 하중의 개념으로 본다면 신뢰성지수(β) 3을 사용하여 제시한 진동식에 기준하여 발파를 실시할 경우 진동규준치를 초과하는 확률이 0.1%에 해당한다. 즉 모든 측정치를 포함하는 발파진동식이라 할 수 있다.

사용한계상태는 신뢰도 90%를 갖는 상태이다. 일반적으로 구조물에 사용되는 강재의 파괴하중(응력)에 대한 항복하중(응력)의 비는 약 85%로 알려져 있다. 즉, 파괴하중에 저항하는 상태가 안전성상태라면, 항복하중에 저항하는 상태가 사용한계상태로서 안전성상태에 비해 신뢰도가 10%(엄밀히 하면 15%이지만 파괴/항복하중비에 대한 변동계수등을 고려하여 안전측으로 보기위해 10%만 감소시킴) 감소되었다. 이러한 구조설계시의 사용한계상태 개념을 도입하여 본 연구에서는 사용한계상태의 신뢰성지수(β)를 1.28로 제시하였다.

극한 한계상태란 발파 2회중 1회의 진동측정치가 발파진동식에 의해 추정된 진동치를 초과하는 신뢰도 50%의 확률을 갖는 상태를 의미한다. 현재 사용되고 있는 발파진동식은 극한 한계상태에 해당한

다고 볼 수 있다.

2.2 발파진동식 및 방향성분

발파진동의 추정식은 아직 이론적 전개가 완전히 이루어지지 않고 있지만 많은 연구자들은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 많은 발파진동의 측정 경험을 토대로, 구조물 피해의 기준이 되는 지반의 최대 진동속도를 지발당 최대 장약량과 폭원으로 부터의 거리를 주요변수로 하여 다음식을 제안하였다.⁽⁶⁾

$$V = K(D/W^n)^m \quad (1)$$

여기에서,

- V : 지반의 진동속도(kine),
- D : 발파원으로부터 대상지점까지의 거리(m)
- W : 지발당 장약량(kg),
- K : 폭약의 종류, 발파방법, 암질, 지형등에 의한 상수
- m : 장약지수
- n : 감쇠지수

본 연구의 경우, 장약지수 m 은 1/3을 사용한 환산거리(scaled distance, $D/W^{1/3}$)에 대한 최대 진동치의 회귀분석에 의해 발파진동추정의 일반식을 유도하고 진동특성을 분석하였다. 또한 V(vertical), L(radial), T(transverse) 방향성분은 Fig. 1과 같다.

2.3 NATM 및 부지정지공사를 위한 발파^(7,8)

NATM공사를 위한 발파는 발파효율이 나쁜 1차 유면 발파이기 때문에 자유면을 증가시키는 목적으로 심패기 발파를 실시한다. 또한 NATM은 암반 자체를 지보로 생각하여 shotcrete, rock bolt로 보강함으로써, 암반 변위를 제어하고자 하는 공법이기

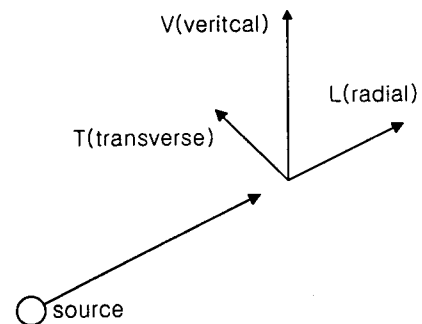


Fig. 1 Wave component parts of blast vibration

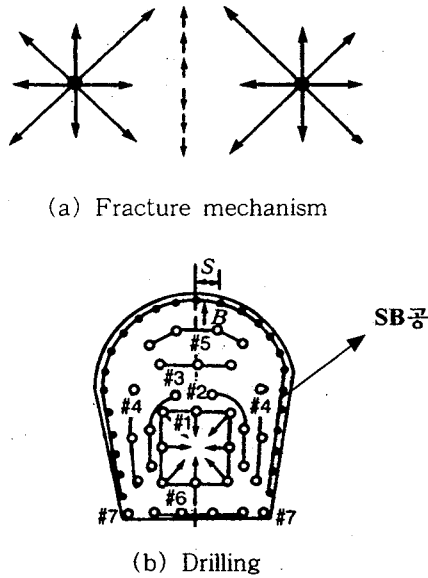


Fig. 2 Fracture mechanism and drilling of smooth blasting

때문에 발파에 의한 암반손상이 적은 것이 요구된다. 이를 위해 장약공 주변에 미치는 폭약의 파괴력을 제어함으로써 특정방향에만 파괴효과를 주고자 하는 공법으로 smooth blasting을 사용한다. Smooth blasting의 파괴기구는 Fig. 2와 같이 인접한 2개의 천공중의 장약을 동시에 기폭하면 각각의 폭약으로부터 응력파가 나와서 방사상으로 전파하여 그 응력파가 공 중앙에서 충돌하므로 서로 간섭하여 인장파를 파생하게 되므로 천공의 선과 직각방향으로 파단이 생기게 된다. Smooth blasting은 decoupling 효과를 이용한다. 부지정지 공사를 위해 사용한 prism cut는 angle cut중 V cut의 한 종류로서 발파공의 천공저(穿孔底)를 일직선으로 하는 심발공으로 굴착단면이 넓고 큰 자유면이 요구될 때 사용된다. 모양은 V cut의 집합형태가 된다.

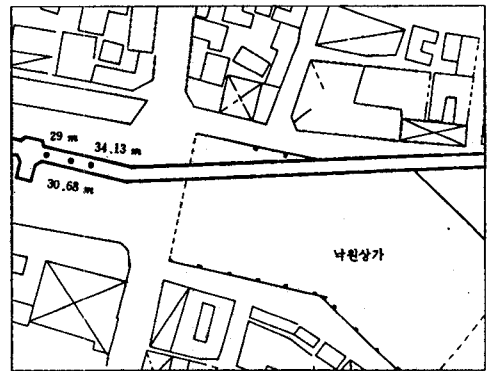
3. 발파진동 측정 및 결과

3.1 서울의 제동 로타리-을지로 전력구 연결공사

서울의 제동로타리-을지로 전력구 연결공사 NATM 발파진동 측정구간의 지반상태는 화강암이 기반암으로 발달분포되어 있으며 이들 기반암은 상당한 심부까지(약 37m) 풍화작용을 받은 결과 풍화암층이 기반암층 상부에 두껍게 발달되어 있었다. 지반진동은 본 풍화암층에서 발파가 실시되는 동안 측정되었다. 발파 및 측정위치도는 Fig. 3과 같으며, 측정치 및 분석결과는 Table 1과 같다.



(a) Blast source



(b) Measurement position

Fig. 3 Blast source and measurement position (Seoul weathered rock)

3.2 부산지하철 3-0 공구

본 공구 주위의 지층단면은 지표로부터 매립토, 봉적토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 순으로 구성되어 있으며, 발파진동은 터널 상부 풍화암층(터널의 상부는 풍화암층, 하부는 연암층)에서 발파가 진행되는 동안 지표에서 측정하였다. 본 시험공구의 지반진동은 최대 0.513 cm/s(V성분), 최소 0.116 cm/s(V성분), 지반 가속도는 0.073~0.33 g로 측정되었다. 발파 및 측정위치도는 Fig. 4와 같으며 blast source는 Fig. 3(a)와 유사하다. 측정치 및 분석결과는 Table 2와 같다.

3.3 영광원전 부지정지공사

발파현장상태를 고려하여 가속도계는 폭원으로부터 약 70 m 떨어진 위치에서 30 m 정도 간격으로 일렬로 설치하여 V성분만을 측정하거나, 한 곳에서 V, L, T 성분을 동시에 측정하였다(Fig. 5). 지반진동은 최대 2.39 cm/s(V성분), 최소 0.0481 cm/s(V

Table 1 Measurement and analysis results for Seoul weathered rock

성분	지발당 최대 장약량 (kg)	측정거리(m)	환산거리 (m/kg ^{1/3})	최대속도 (cm/s)	최대가속도 (g)	타월진동수 (Hz)	비고
V	1.35	29.00	26.24	0.395	0.195	52.50	풍화암 / 함수폭약 / 심발발파 + Smooth blasting
V	1.35	30.68	27.76	0.392	0.181	45.00	
V	1.35	34.13	30.88	0.318	0.116	45.00	
L	1.35	29.43	26.63	0.279	0.094	86.25	
T	1.35	29.43	26.63	0.280	0.109	130.00	
V	1.35	29.43	26.63	0.392	0.140	50.00	
V	1.35	33.00	29.86	0.483	0.138	51.25	
V	1.35	36.00	32.57	0.423	0.122	40.00	
V	1.35	39.00	35.29	0.335	0.147	78.75	
L	0.675	30.41	34.67	0.135	0.052	106.25	
T	0.675	30.41	34.67	0.110	0.062	83.75	
V	0.675	30.41	34.67	0.245	0.094	33.75	
V	0.3375	40.36	57.97	0.096	0.038	41.25	
V	0.3375	44.20	63.48	0.075	0.027	37.50	
V	0.3375	31.00	44.52	0.207	0.067	25.00	
V	0.3375	33.00	47.40	0.129	0.057	55.00	

Table 2 Measurement and analysis results for Pusan weathered rock

성분	지발당 최대 장약량 (kg)	측정거리(m)	환산거리 (m/kg ^{1/3})	최대속도 (cm/s)	최대가속도 (g)	타월진동수 (Hz)	비고
V	0.90	27.00	27.97	0.513	0.282	60.00	풍화암(상부) 연암(하부) / 함수폭약 / 심발발파 + Smooth blasting
V	0.90	28.79	29.82	0.330	0.149	59.50	
V	0.90	40.80	41.80	0.116	0.073	59.00	
V	0.45	27.46	35.83	0.316	0.254	57.00	
V	0.45	35.47	46.29	0.128	0.091	57.00	
V	0.45	40.36	52.27	0.120	0.086	56.50	
V	0.45	28.79	37.57	0.324	0.336	63.50	
V	0.45	33.60	43.85	0.280	0.131	59.00	
V	0.45	44.20	57.68	0.120	0.116	27.50	

성분)로 측정되었다. 그리고 측정된 지반 가속도는 0.507~0.0133 g 이다.

4. 신뢰성 지수(β)를 이용한 해석 결과

4.1 발파진동식

각각의 시험발파현장에서 실측한 Table 1~3의 측정치를 사용하여 발파진동속도와 가속도를 대수 그래프에 도시하고 회귀분석을 수행하여 1차적으로 신뢰성지수(β)가 0 에 해당하는 진동식을 유도하였다. 유도된 진동식을 나타내는 직선식에 대한 각 측정치들의 표준편차를 고려하여 신뢰성지수(β) 1.28 과 3에 해당하는 진동식을 유도하여 한 그래프상에

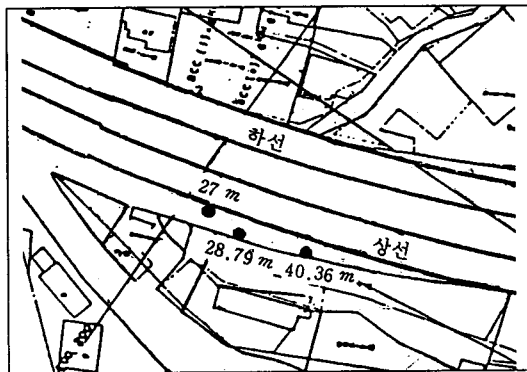
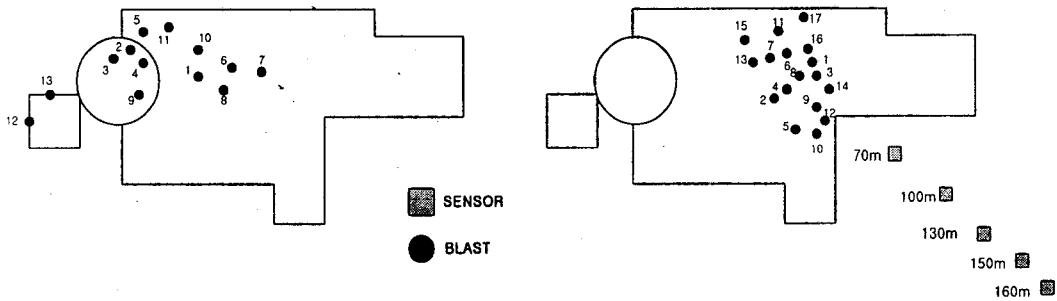


Fig. 4 Measurement position(Pusan weathered rock)



(a) Blast source



(b) Measurement position

Fig. 5 Blast source and measurement position(Youngkwang quartz andesite)

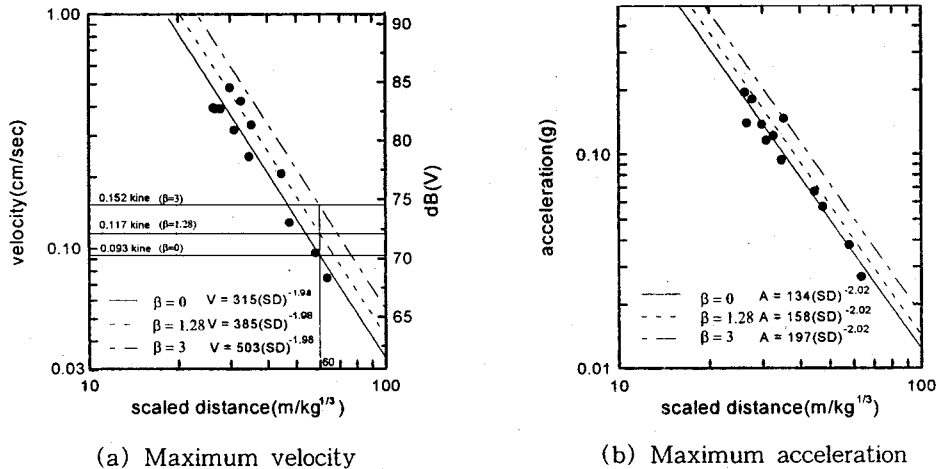


Fig. 6 Blast vibration equations for Seoul weathered rock using reliability index(β)

나타내었다. 분석에 사용된 측정치들은 V, L, T 성분
분에 대한 진동측정치중 V성분에 대한 진동측정치
만을 고려하였다.

(1) 서울의 제동로타리-을지로 전력구 연결공사
신뢰성지수(β)를 사용하여 본 시험공구의 발파진
동식을 유도한 결과 지반 진동속도의 경우 신뢰성지

수(β)가 0일 때(극한한계상태) 발파진동상수 K는
315였고 감쇠지수(n)는 -1.98였으며, 회귀선에 대한
편차 정도를 나타내는 상관계수(r) 값은 -0.95로서
양호하였다. 신뢰성지수(β)가 1.28(사용한계상태)
과 3(안전성상태)일 때 발파진동상수는 각각 385,
503으로 얻어졌다(Fig. 6(a)참고). Fig. 6(a)는 임

의 환산거리에 대해 사용자가 요구하는 신뢰도를 갖는 신뢰성지수(β)를 선택하여 진동속도를 추정할 수 있게 하였으며, 추정된 진동속도를 진동레벨(dB)로 환산할 수 있도록 하였다. 예를 들어 환산거리 $60(m/kg^{1/3})$ 에 대한 진동속도는 신뢰성지수

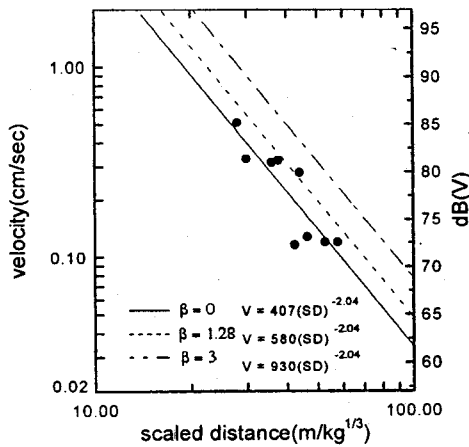
(β)가 0, 1.28, 3일 때 각각 0.093 kine, 0.117 kine, 0.152 kine으로 추정할 수 있으며, 이에 해당하는 진동레벨(dB) 또한 70.3 dB, 72.3 dB, 74.5 dB로 추정할 수 있다. 지반의 진동가속도의 경우는 Fig. 6(b)에 나타내었으며, 유도된 발파진동 속도 및 가

Table 3 Measurement and analysis results for Youngkwang quartz andesite

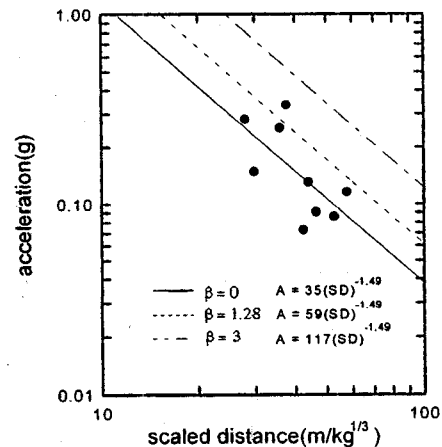
성분	지발당 최대 장약량 (kg)	측정거리(m)	환산거리 ($m/kg^{1/3}$)	최대속도 (cm/s)	최대가속도 (g)	탁월진동수 (Hz)	비고
L	30.00	151.36	48.71	0.370	0.0799	32.50	석영 안산암 / 교질 다이너 마이트 / Prism cut
T		151.36	48.71	0.340	0.0732	25.00	
V		151.36	48.71	0.319	0.0672	12.50	
V	26.25	110.64	37.23	0.275	0.1152	35.00	
V		140.38	47.23	0.423	0.0599	27.50	
V		170.87	57.49	0.110	0.0376	27.50	
L	22.50	116.98	41.44	0.559	0.165	47.50	
T		116.98	41.44	0.276	0.0768	30.00	
V		116.98	41.44	0.208	0.0818	30.00	
V	30.00	116.29	37.42	0.335	0.101	37.50	
V		146.04	47.00	0.260	0.0618	27.50	
V		176.92	56.94	0.138	0.0392	27.50	
V	30.00(MSD-15)	99.15	31.91	0.401	0.124	30.00	
V		128.46	41.34	0.330	0.112	27.50	
V		158.43	50.99	0.145	0.0474	27.50	
L	37.50	120.25	35.93	0.703	0.167	45.00	
T		120.25	35.93	0.416	0.125	25.00	
V		120.25	35.93	0.366	0.0835	37.50	
V	18.75	115.18	43.36	0.162	0.0321	37.50	
V		144.86	54.53	0.0694	0.0163	27.50	
V		175.24	65.96	0.100	0.0232	-	
L	22.50 (DSD-12)	95.29	33.75	0.761	0.167	32.50	
T		95.29	33.75	0.705	0.174	30.00	
V		95.29	33.75	0.406	0.109	32.50	
L	39.00	59.59	17.57	1.860	0.501	37.50	
T		59.59	17.57	0.879	0.265	22.50	
V		59.59	17.57	2.090	0.506	27.50	
L	7.50	185.89	94.97	0.109	0.0195	30.00	
T		185.89	94.97	0.0664	0.0207	45.00	
V		185.89	94.97	0.0529	0.0197	42.50	
V	38.25	61.80	18.34	2.390	0.507	22.50	
V		91.19	27.06	0.864	0.231	37.50	
V		120.79	35.85	0.347	0.0952	15.00	
V	8.25	126.30	62.51	0.130	0.0343	15.00	
V		155.98	77.19	0.0903	0.0236	-	
V		186.38	92.24	0.0481	0.0133	-	
V	15.00	99.11	40.19	0.280	0.0788	35.00	
V		128.86	52.25	0.277	0.0743	37.50	
V		159.34	64.61	0.0993	0.0330	25.00	

Table 4 Suggestion of blast vibration equations using reliability index(β)

암질	신뢰성 지수 (β)	진동추정식		신뢰도 (%)	상태	상관계수(r)		표준편차(σ_x)		암석강도 (kg/cm^2)	발파형태 / 화약종류
		속도V(cm/s)	가속도A(g)			V	A	V	A		
서 울 풍 화암	0	$315(\text{SD})^{-1.98}$	$134(\text{SD})^{-2.02}$	50	극한한계						심발발파 / 함수폭약
	1.28	$385(\text{SD})^{-1.98}$	$158(\text{SD})^{-2.02}$	90	사용한계	-0.95	-0.97	0.156	0.129	200-1000	
	3	$503(\text{SD})^{-1.98}$	$197(\text{SD})^{-2.02}$	99.9	안전성						
부 산 풍 화암	0	$407(\text{SD})^{-2.04}$	$35(\text{SD})^{-1.49}$	50	극한한계						심발발파 / 함수폭약
	1.28	$580(\text{SD})^{-2.04}$	$59(\text{SD})^{-1.49}$	90	사용한계	-0.86	-0.65	0.275	0.402	200-1000	
	3	$930(\text{SD})^{-2.04}$	$117(\text{SD})^{-1.49}$	99.9	안전성						
영 석 광 영 안 산암	0	$1132(\text{SD})^{-2.23}$	$211(\text{SD})^{-2.13}$	50	극한한계						Prism cut / 교질 다이너 마이트
	1.28	$1654(\text{SD})^{-2.23}$	$305(\text{SD})^{-2.13}$	90	사용한계	-0.95	-0.95	0.296	0.287	평균 800	
	3	$2750(\text{SD})^{-2.23}$	$500(\text{SD})^{-2.13}$	99.9	안전성						



(a) Maximum velocity



(b) Maximum acceleration

Fig. 7 Blast vibration equations for Pusan weathered rock using reliability index(β)

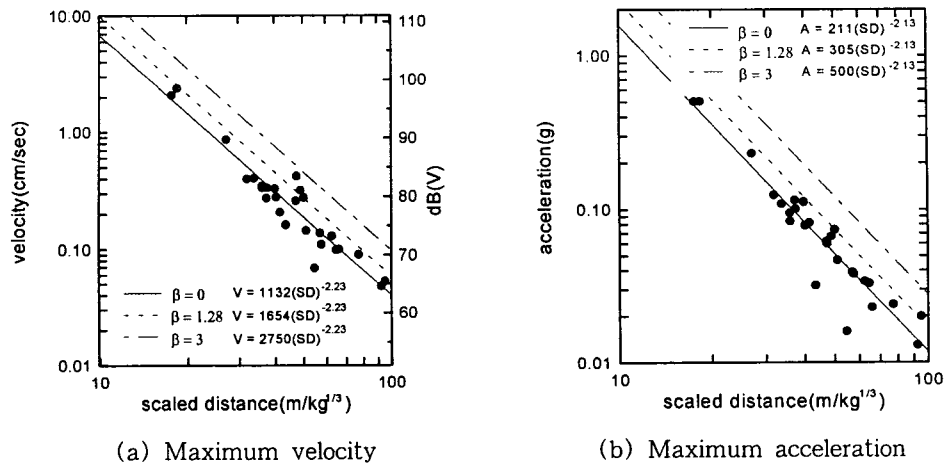


Fig. 8 Blast vibration equations for Youngkwang quartz andesite using reliability index (β)

Table 5 Allowable value of blasting vibration

등급 구분	Class I	Class II	Class III	Class IV
구조물구분	문화재 및 Computer 시설물 주변	주택·아파트 (실금이 나타나 있는 정도)	상가 (금이 나타나 있는 블록 구조물)	철근콘크리트 빌딩 및 공장
구조물기초에서의 허용진동치 (kine)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

속도 추정식과 상관계수, 표준편차 등을 다음 Table 4에 종합적으로 나타내었다.

(2) 부산지하철 3-0 공구

본 발파시험공구에서 유도된 진동속도 추정식은 신뢰성지수(β)가 0일 때 발파진동상수 K는 407이었고 감쇠지수 n은 -2.04였으며 상관계수(r)는 -0.86으로서 양호하였다. 신뢰성지수(β)가 1.28과 3일 때 발파진동상수는 각각 580, 930으로 얻어졌다(Fig. 7(a)참고). 유도된 발파진동 속도 및 가속도 추정식과 상관계수, 표준편차등을 Table 4에 나타내었다.

(3) 영광원전 부지정지공사

Fig. 8(a)는 본 시험발파현장에서 유도된 진동속도 추정식을 나타내는 것으로서 신뢰성지수(β)가 0, 1.28, 3일 때 발파진동상수 K는 각각 1132, 1654, 2750이었고 감쇠지수 n은 -2.23였으며 상관계수(r)는 -0.95로서 양호하였다. 또한 Fig. 8(b)는 진동가속도의 추정식을 나타내고 있으며, 유도된 발파진동속도 및 가속도 추정식과 상관계수, 표준편차등을 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서 발파진동치를 추정하기 위하여 제시한 각각의 발파현장에 대한 그래프(Figs. 6~8)는 본 시험공구와 암질조건, 발파형태 및 방법, 사용폭약

약등이 동일한 발파현장에 적용하여 발파진동 속도 및 가속도를 추정하는데 사용이 가능하다. 따라서, 우리나라의 대표지반에 대하여 위와 같은 신뢰성 이론을 도입한 발파진동식에 대한 연구가 계속적으로 수행되어 암질조건, 발파형태 및 방법, 사용폭약등이 종합적으로 고려된 발파진동 추정식이 산정 되어야 한다

4.2 허용장약량 산출식

허용장약량은 서울과 부산지하철 공사를 위한 발파시 진동규준치로 사용된 다음 Table 5의 값을 기준하여 산출하였다. 허용장약량의 산출은 Table 5에 제시된 발파현장의 진동규준(Class I, II, III, IV)을 선택한 후 사용자가 원하는 신뢰도를 갖는 신뢰성지수(β)를 선택하여 허용장약량을 결정할 수 있게 하였다(Figs. 9~11참고). 또한 Table 4에서 제시한 발파진동식을 사용하여 지발당 허용장약량을 산출하는 계산식을 다음 Table 6에 나타내었다. 발파현장의 지발당 최대 허용장약량을 산출하기 위한 그래프(Figs. 9~11) 및 계산식은 본 시험공구와 암질조건, 발파형태 및 방법, 사용폭약등이 동일한 발파현장에 적용하여 허용장약량을 산출하는데 사용이 가능하다.

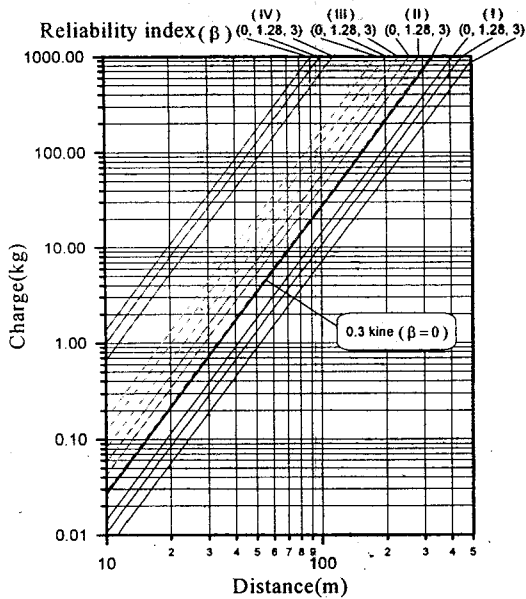


Fig. 9 Determination of maximum charge weight (Seoul weathered rock)

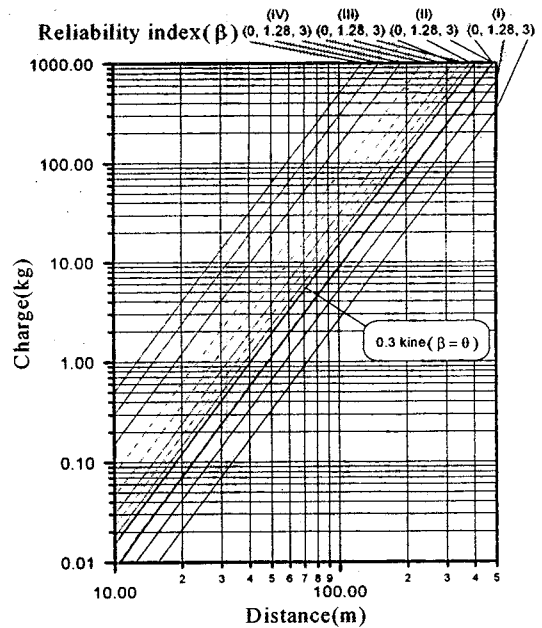


Fig. 11 Determination of maximum charge weight (Youngkwang quartz andesite)

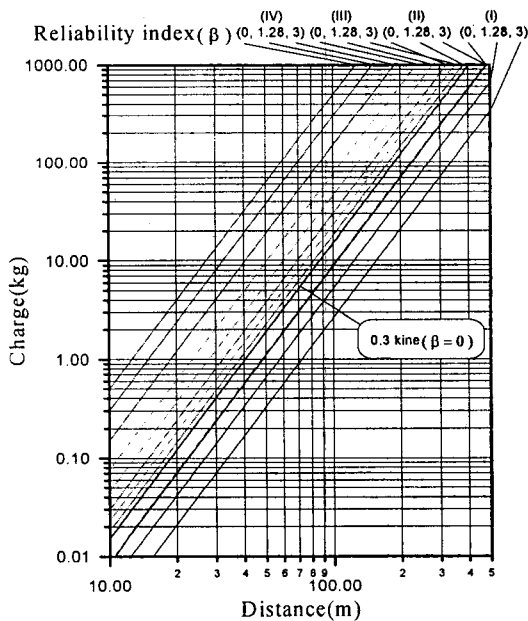


Fig. 10 Determination of maximum charge weight (Pusan weathered rock)

4.3 효율적인 발파를 위한 신뢰성지수(β), 발파 진동식 및 허용장약량 산출식

본 연구에서는 효율적인 발파를 위한 신뢰성지수(β)를 결정하기 위하여 현재 많은 발파현장에서는 0.5 kine으로 주어진 진동규준치를 민원의 발생을 우려하여 0.3 kine으로 임의적으로 낮춰 발파를 수행하고 있는 실정을 고려하였다.⁽⁹⁾ 시험발파현장 3

Table 6 Equations for determination of maximum charge weight

암질	β	허용장약량 산출식
서울 풍화암	0	$W = (V_c / 315.14)^{1.5151} \cdot D^3$
	1.28	$W = (V_c / 384.90)^{1.5151} \cdot D^3$
	3	$W = (V_c / 503.21)^{1.5151} \cdot D^3$
부산 풍화암	0	$W = (V_c / 407.48)^{1.4706} \cdot D^3$
	1.28	$W = (V_c / 579.82)^{1.4706} \cdot D^3$
	3	$W = (V_c / 930.18)^{1.4706} \cdot D^3$
영광 영안산암	0	$W = (V_c / 1131.73)^{1.3453} \cdot D^3$
	1.28	$W = (V_c / 1654.01)^{1.3453} \cdot D^3$
	3	$W = (V_c / 2750.32)^{1.3453} \cdot D^3$

W: 허용장약량(kg), V_c : 진동규준치(kine), D: 측정거리(m)

곳의 진동규준치를 0.5 kine으로 가정한 후 신뢰성지수(β)를 사용하여 Table 6에서 제시한 허용장약량 산출식의 사용타당성을 비교·평가할 수 있도록 신뢰성지수(β)를 0, 1.28, 3으로 사용하여 허용장약량을 산출한 경우와 임의적으로 0.3 kine으로 낮춰 허용장약량을 산출하는 경우를 비교하여 신뢰성지수(β)값이 얼마일 때 가장 적합하고 효율적인 허용장

Table 7 Comparison of maximum charge weight

암질	0.5 kine (Class II)			0.3 kine	거리 (m)
	$\beta = 0$	$\beta = 1.28$	$\beta = 3$	$\beta = 0$	
서울 풍화암	7.16 kg	5.29 kg	3.53 kg	3.30 kg	50
	57.32 kg	42.33 kg	28.21 kg	26.43 kg	100
부산 풍화암	6.93 kg	4.06 kg	1.98 kg	3.20 kg	50
	59.02 kg	34.59 kg	16.90 kg	27.22 kg	100
석영 안산암	3.75 kg	2.25 kg	1.13 kg	1.89 kg	50
	30.00 kg	17.99 kg	9.07 kg	15.07 kg	100

약량이 산출되는지를 각 발파현장의 조건에 따라 비교하였다. Table 7은 각각의 경우에 대해 산출된 허용장약량을 측정거리 50 m와 100 m의 경우로 구분하여 발파현장에 따라 비교한 결과이다.

비교결과 서울 풍화암의 경우는 0.5 kine의 진동규준치에 대해 신뢰성지수(β) 3을 사용하여 허용장약량을 산출한 경우보다 0.3 kine으로 진동규준치를 낮추어 발파를 실시하는 경우의 허용장약량이 더 작게 산출되어 임의적으로 발파 진동규준치를 낮추는 경우가 더 비효율적임을 알 수 있다. 본 시험공구와 같은 경우 주변건물의 조건에 따라 신뢰성지수(β)를 1.28혹은 3을 사용하여 발파를 수행하여도 충분히 안전한 발파를 수행할 수 있다. 그러나 신뢰성지수(β) 3을 사용하여 발파를 실시하는 경우는 1.28을 사용하는 경우보다 상대적으로 9.9%의 신뢰도를 더 얻을 수 있지만 허용장약량은 33% (1.28을 기준할 때 14.12 kg감소)가 감소하게 되어 비효율적인 발파가 이루어 짐을 의미한다.

부산 풍화암과 영광 석영안산암의 경우는 0.3 kine으로 진동규준치를 낮추어 산출한 허용장약량은 0.5 kine의 진동규준치에 대해 신뢰성지수(β) 1.28과 3을 사용하여 허용장약량을 산출한 경우의 사이에 있어 0.3 kine에 기준하여 허용장약량을 산출하는 경우 신뢰성지수(β)를 3으로 선택하여 허용장약량을

산출하는 경우보다 많은 장약량이지만 1.28을 사용하는 경우보다는 비효율적임을 알 수 있다. 이와 같이 일률적으로 0.5 kine의 진동규준치를 0.3 kine으로 낮추어 발파를 실시하는 경우는 정확한 신뢰수준을 알 수 없어 현장에 따라 필요이상으로 안전한 비효율적인 발파가 이루어질 수도 있으며 또한 필요한 신뢰수준을 갖지 못하는 불안정한 발파가 이루어 질 수도 있음을 의미한다.

본 연구에서는 사용한계상태에 해당하는 신뢰성지수(β) 1.28을 발파공사를 진행하는데 있어 필요한 안전성과 사용성을 가지는 효율적인 발파설계를 위한 신뢰성지수(β)로 제시한다. 신뢰성지수(β) 1.28은 사용성이나 경제성보다는 안전성이 우선적으로 고려되어야 하는 발파현장 혹은 주변에 시설물이나 사람이 없는 현장에서 경제성을 우선하여 발파를 수행하는 경우가 아닌 일반적인 발파현장에서 발파설계시 사용할 수 있다. 또한 본 연구의 대상이 된 각 시험발파현장에 대해 효율적인 발파설계를 위한 발파진동식과 허용장약량 산출식을 다음 Table 8과 같이 제시한다.

이와같이 신뢰성지수(β)를 사용한 허용장약량의 산출은 진동규준치에 신뢰도를 부여하여 발파를 실시하게 되므로 현재 발파현장에서 민원의 발생을 우려하여 제시된 진동규준치를 임의적으로 낮춰 허용장약량을 산출한 후 발파를 시행하는 문제점을 정확한 이론적 근거를 가지고 해결할 수 있다.

5. 결 론

가장 효율적으로 발파를 수행할 수 있는 신뢰성지수(β)를 결정하여 각 시험발파 현장에 대한 대표적인 발파진동식과 허용장약량 산출식을 제시한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 사용한계상태에 해당하는 신뢰성지수(β) 1.28을 발파공사를 진행하는데 있어 필요한 안전성과 사용성을 가지는 효율적인 발파설계를 위한

Table 8 Suggestion of blast design equations for efficient blast

암질	β	발파진동식		허용장약량 산출식
		속도 V(cm/s)	가속도 A(g)	
서울 풍화암	1.28	$V = 385(SD)^{-1.98}$	$A = 158(SD)^{-2.02}$	$W = (V_c / 384.90)^{1.511} \cdot D^3$
부산 풍화암		$V = 580(SD)^{-2.04}$	$A = 59(SD)^{-1.49}$	$W = (V_c / 579.82)^{1.416} \cdot D^3$
영광 석영안산암		$V = 1654(SD)^{-2.23}$	$A = 305(SD)^{-2.15}$	$W = (V_c / 1654.01)^{1.3453} \cdot D^3$

신뢰성지수(β)로 제시하였다.

- (2) 효율적인 발파설계를 위한 허용장약량 산출식을 서울 풍화암, 부산 풍화암, 영광 석영안산암에 대해 $W = (V_c / 384.90)^{1.5151} \cdot D^3$, $W = (V_c / 579.82)^{1.4706} \cdot D^3$, $W = (V_c / 1654.01)^{1.3453} \cdot D^3$, 발파진동에 대해 $V = 385(SD)^{-1.98}$, $V = 580(SD)^{-2.04}$, $V = 1654(SD)^{-2.23}$ 으로 각각 제시하였다.
- (3) 본 연구에서 제시한 신뢰성이론을 사용하여 발파설계가 이루어진다면(특히 $\beta = 1.28$) 현재 많은 발파현장에서 주어진 진동기준치를 민원의 발생을 우려하여 임의적으로 낮춰 허용장 약량을 산출한 후 발파를 시행하는 비합리적인 문제점을 해결할 수 있을 것으로 사료되며, 사용자가 요구하는 신뢰도를 갖는 발파설계가 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 박연수, 박선준, 강성후, 1996, "실험적 방법에 의한 발파진동레벨의 측정 및 영향평가", 전남대학교 공업기술연구소논문집, 제 38 권, pp. 107~116.
- (2) 박연수, 이두영, 1989, "건설진동의 영향평가 및 대책", 대한건축학회지, 제 33 권, 제 8 호, pp. 24~34.
- (3) 박연수 등, 1989, "건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구(I,II)", 연구보고서, DWERI-CE-11, (주)대우엔지니어링기술연구소.
- (4) 유태성 등(1987), "터널신공법(NATM)감리보고서(부산지하철 1호선 3-0공구)", 감리보고서, (주)대우엔지니어링 토목사업본부.
- (5) 박연수 등, 1989, "영광 1, 2호기 원자력발전소 구조물 및 기기의 발파진동 영향평가 및 대책", 연구용역보고서, (주)대우엔지니어링기술연구소.
- (6) Dowding, C. H., 1996, "Construction Vibrations", Prentice Hall.
- (7) 노영배, 1997, "화약발파기초이론", 구미서관, pp. 185~200.
- (8) 윤지선, 1996, "최신발파기술", 구미서관, pp. 12~25.
- (9) 안명석, 안상영, 1997, "도심지 발파에서 민원 처리사례", 대한토목학회지, Vol. 45, No. 9, pp. 63~69.