

강건설계법을 이용한 스웨덴식 벤치발파의 설계 인자 분석

양형식^{1)*}

Parameter Analysis of Swedish Bench Blast Design using Robust Design Method

Hyung-Sik Yang

Abstract Parameters of Swedish bench blast design was analyzed by robust design method. Orthogonal array which is adopted in this study was $L_9(3^4)$ and the parameters were hole diameter, explosive type, hole inclination and rock factor of 3 levels. Result of analysis showed that maximum and minimum burden are most affected by hole diameter, followed by explosive type, rock type and inclination of hole. Parameters affecting specific charge are in the order of rock type, explosive type and to specific drilling are hole diameter and explosive type. Cost analysis showed that robust design is capable of parameter optimization.

Key words Bench blast design, Robust design, Maximum burden, Specific charge, Specific drilling

초 록 스웨덴 식 벤치발파 설계방식에 대하여 실험계획법을 이용하여 설계인자를 분석하였다. 분석에 사용된 직교배열은 $L_9(3^4)$ 이었고 변수는 각각 3수준의 값을 갖는 천공직경, 화약의 종류, 공의 경사와 암석의 종류로 하였다. 분석결과 저항선 결정 영향요소는 천공직경, 화약의 종류, 암석의 종류 그리고 공의 경사 순이었으며 비장약량 영향요소는 암석의 종류, 화약의 종류 그리고 비천공장에 영향을 미치는 요소는 천공직경과 화약의 종류순이었다. 또 강건설계를 이용한 경제성 검토에서 최적인자 선택이 가능함을 확인하였다.

핵심어 벤치발파설계, 실험계획법, 최대저항선, 비장약량, 비천공장

1. 서 론

스웨덴식 벤치발파 설계는 세계적으로 널리 알려지고 체계적인 발파 설계 방식으로서 많이 적용되고 있다. 이 방식은 암석역학적인 고찰과 오랜 경험이 융합되어 만들어졌다. 그러나 최대 저항선을 결정하기 위하여 적용하는 바다장약 개념과 상부장약 개념은 개념적으로는 잘 설명이 되지만, 현실적으로 그대로 적용하기는 어렵다. 특히 암석의 파괴저항과 관련한 암

석계수가 비장약량의 개념으로 구성되어 있고 이에 기초하여 설계가 이루어지지만, 최종적인 비장약량은 언제나 설계 초에 가정하는 화약계수와 일치하지 않는 등의 문제가 있다.

이 연구에서는 이러한 문제점을 해소하기 위하여 먼저 스웨덴식 벤치발파 설계의 인자들이 설계의 결과로서 결정되는 저항선과 비장약량 및 비천공장에 미치는 영향과 그 민감도를 분석하였다. 이를 위하여 실험계획법의 일종인 강건설계법을 적용하여 수치실험을 하였다.

¹⁾ 전남대학교 교수

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2013년 12월 1일

심사 완료일 : 2013년 12월 17일

게재 승인일 : 2013년 12월 21일

2. 이론적 배경

2.1 스웨덴 식 벤치발파 설계

Gustaffson(1971)은 Dynamex를 주로 사용하는 중

소구경 벤치발파의 설계방법을 제시하였다. 설계에서 암석계수 $c=0.4\text{kg}/\text{m}^3$ 을 기준으로 하였으며 장약밀도는 $1.25\text{kg}/\text{dm}^3$ 즉 $1.25\text{kg}/\text{l}$ 로 가정하고 설계하였다. 공의 경사를 3:1로 가정한 그의 설계 과정에서 최대저항선과 최소저항선의 결정식은 다음과 같다.

$$\text{최대저항선 } V_{\max} = 45d \text{ (m)} \quad (1)$$

$$\text{최소저항선 } V_1 = V_{\max} - F \text{ (m)} \quad (2)$$

여기서 d 는 천공직경(mm)이며 F 는 천공오차이다.

또 장약량 설계의 기초가 되는 바닥장약밀도는 다음과 같다.

$$\text{바닥장약밀도 } Q_{bk} = \frac{d^2}{1,000} \text{ (kg/m)} \quad (3)$$

공의 깊이 $H(\text{m})$ 로부터 바닥장약장, 전색장을 각각 산정하고 나머지를 상부장약으로 하여 바닥장약량과 상부장약량을 구한 다음 이를 합하면 공당 장약량 Q_{tot} 을 얻을 수 있고 이로부터 비장약장을 구할 수 있다.

$$\text{비장약량 } q = \frac{\text{열당 공 수} \times Q_{tot}}{V_1 \times K \times B} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4)$$

여기서 K 와 B 는 각각 벤치의 높이(m)와 폭(m)이다. 같은 방법으로 비천공장을 구할 수 있다.

$$\text{비천공장 } b = \frac{\text{열당 공 수} \times H}{V_1 \times K \times B} \text{ (m/m}^3\text{)} \quad (5)$$

Langefors(1978)는 암반공학에 입각하여 저항선 결정 방법을 이론적으로 유도하였다.

$$\text{최대저항선 } V = \frac{d_b}{33} \sqrt{\frac{Ps}{cfE/V}} \approx 0.046d \text{ (m)} \quad (6)$$

여기서 d_b 는 천공직경(mm), P 는 화약비중(kg/l), s 는 화약강도이며 \bar{c} 는 암석계수 c 의 함수로 나타나는 값이다. 또 f 는 구속도이고 E/V 는 저항선에 대한 공간격의 비이다.

Olofsson(2002)은 Langefors의 식을 재구성한 Bergqvist

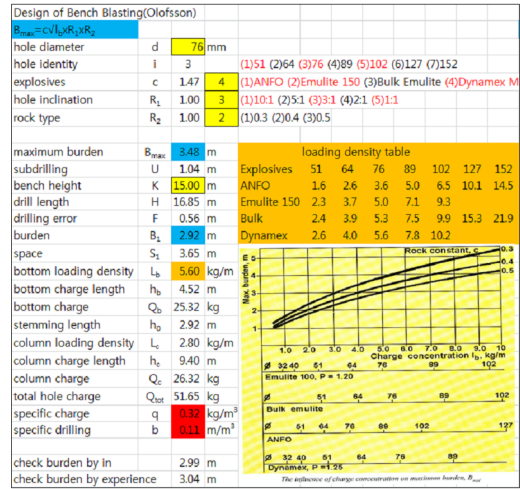


Fig. 1. Design program for Swedish bench blasting.

공식, $B = \sqrt{\frac{l_b}{S/B \cdot Q}}$ 을 단순화하여 화약의 종류와 암석의 물성 그리고 발파공의 경사를 반영하여 최대저항선을 좀 더 수월하게 결정할 수 있도록 하였다.

$$\text{최대저항선 } B_{\max} = c\sqrt{l_b} R_1 R_2 \text{ (m)} \quad (7)$$

여기서 l_b 는 바닥 장약밀도(kg/m)이며 Q_{bk} 와 같은 개념이다. R_1 과 R_2 는 각각 공의 경사와 암석의 종류에 의해 결정되는 보정계수이다.

바닥장약밀도는 다음과 같이 개략적으로 구할 수 있다.

$$\text{바닥장약밀도 } l_b = 7.85d^2 P \text{ (kg/m)} \quad (8)$$

본 연구에서는 Olofsson에 의해 정리된 최대저항선과 바닥장약밀도 결정식을 적용하고 나머지 계산과정은 Gustaffson의 방식을 따랐다.

Fig. 1은 이를 바탕으로 작성된 벤치발파 설계표이다.

2.2 실험계획법

인자의 영향과 민감성을 검토하기 위하여 강건설계법(김호성 외, 1992)을 채택하였다. 강건설계법은 인자들을 독립적으로 배열한 제한된 수의 실험을 통하여 경우의 수가 엄청나게 많은 실험을 하는 것과 같은

Table 1. Various orthogonal arrays

Orthogonal array	Total case	Actual case	Remarks
$L_4(2^3)$	8	4	2 level parameter 3
$L_8(2^7)$	128	8	2 level parameter 7
$L_9(3^4)$	81	9	3 level parameter 4
$L_{12}(2^{11})$	2,048	12	2 level parameter 11
$L_{16}(2^{15})$	32,768	16	2 level parameter 15
$L_{16}(4^5)$	1,024	16	4 level parameter 5
$L_{18}(2^1 \times 3^7)$	4,374	18	2 & 3 level parameter 8
$L_{25}(5^6)$	15,625	25	5 level parameter 6
$L_{27}(3^{13})$	1,594,324	27	3 level parameter 13
L_{32}, L_{36}, L_{50} etc.			etc.

효과를 얻을 수 있도록 고안된 방법이다.

Table 1은 주로 사용되는 직교배열들이다. 표에서 $L_8(2^7)$ 직교배열은 2수준 즉 두 가지의 선택이 가능한 인자가 일곱 개 있을 때 가능한 인자의 조합은 $2^7 = 128$ 가지이지만 단지 8번의 실험만으로 모든 경우의 수에서 기대되는 결과와 경우에 따라서는 그들 간의 교호작용을 해석할 수 있고 최적의 조건을 찾을 수도 있다.

각 인자의 개별 효과와 최적화는 평균분석 ANOM을 통하여 구할 수 있으며 인자들의 상대적 효과와 민감도는 분산분석 ANOVA를 통하여 구할 수 있다.

이러한 분석을 위하여 채택할 최종통계량은

$$\eta_i = -10 \log_{10}(\text{파라미터의 제곱평균}) \quad (9)$$

으로 정의되며 S/N비(신호 대 잡음비)로 불린다. 인자 수준의 효과는 전체 평균으로부터 그 인자수준에 의한 결과의 편차로 정의된다.

3. 수치실험

본 연구에서 벤치발파의 경제성을 결정하는 주요 제원으로는 저항선과 비장약량 및 비천공장이고 이들의 결정에 영향을 미치는 1차 민감도 분석을 위하여 선택한 인자는 발파공 직경 d , 폭약의 종류, 암석의 종류, 천공 경사이며 폭약의 종류는 화약상수 c , 암석

Table 2. Orthogonal array $L_9(3^4)$

Nr.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Table 3. Three levels for design parameters

Level	$d(mm)$	c	R_1	R_2
1	51	1.36(ANFO)	0.95	0.3
2	76	1.45(Emulite)	1	0.4
3	102	1.47(Dynamite)	1.05	0.5

의 종류는 암석계수 R_2 그리고 천공 경사는 보정계수 R_1 으로써 적용된다.

따라서 스웨덴 식 벤치 발파에서 주로 사용되는 인자 값들의 변화를 감안하여 3수준 4인자의 직교배열 $L_9(3^4)$ 를 선택하였다(Table 2). 이에 따른 수치실험 조건은 table 3과 같다.

민감도 분석을 위한 최종통계량으로는 최대 및 최소 저항선과 비장약량, 비천공장을 각각 선택하였다.

4. 결과와 해석

최대 및 최소저항선 결정에 대한 인자의 민감도 분석의 결과는 fig. 2와 같다.

그림에서 저항선의 결정에 가장 큰 영향을 미치는 것은 발파공의 직경이며 이어서 화약의 종류와 암석의 종류인 것을 알 수 있다. 주어진 범위 내에서 변동 기여율은 발파공의 직경이 48.5%, 화약의 종류가 23%, 암석의 종류가 21.3%였다. 최소저항선은 식(2)에서 보는 바와 같이 최대저항선에 종속되어 영향인자도 같을 것으로 예측되고 실제 분석결과도 같은 경향을 보였다.

Table 4는 비장약량과 비천공장에 미치는 인자들의 영향을 보인 것이다. 비장약량에 있어서는 암석의 종

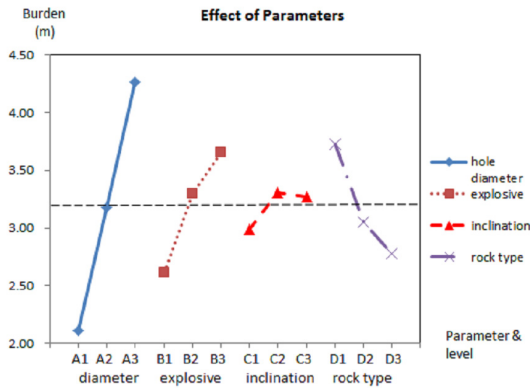


Fig. 2. Effect of parameters on determining burden of bench blasting.

류가 가장 큰 영향을 미쳤으며 나머지 세 인자들 중에서는 화약의 종류가 근소한 차이로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 암석의 종류가 비장약량의 변동에 미치는 기여율은 41.9%였으며 나머지 요인들은 18.6%~20.9%로 비슷하였다. 비천공장에서는 발파공의 직경이 가장 크게 영향을 미치며 화약의 종류, 천공경사, 암석의 종류순으로 반영되었다. 비천공장의 분산 기여율은 발파공 직경이 54.5%, 화약의 종류가 23.6%로 이들 두 인자의 변동 합이 78%에 달하였다.

이로써 저항선을 달리하는 등 발파패턴의 변화를 꾀할 필요가 있을 때 가장 유의해야 할 변수가 발파공의 직경과 화약류의 선택임을 알 수 있다.

Table 4. Effect of parameters on specific charge and drilling

Exp. nr.	hole diameter	explosive	inclination	rock type	specific charge	hole diameter	explosive	inclination	rock type	specific drilling
1	1	1	1	1	0.42	1	1	1	1	0.49
2	1	2	2	2	0.39	1	2	2	2	0.32
3	1	3	3	3	0.43	1	3	3	3	0.31
4	2	1	2	3	0.54	2	1	2	3	0.28
5	2	2	3	1	0.22	2	2	3	1	0.08
6	2	3	1	2	0.36	2	3	1	2	0.12
7	3	1	3	2	0.34	3	1	3	2	0.09
8	3	2	1	3	0.44	3	2	1	3	0.09
9	3	3	2	1	0.23	3	3	2	1	0.04
level 1	0.41	0.43	0.41	0.29	0.21	0.37	0.29	0.23	0.20	0.04
level 2	0.37	0.35	0.39	0.36	0.37	0.16	0.16	0.21	0.18	0.20
level 3	0.34	0.34	0.33	0.47	0.84	0.07	0.16	0.16	0.23	0.99
difference	0.08	0.09	0.08	0.18		0.30	0.13	0.07	0.05	

Table 5. Optimization of parameters for blasting cost by robust design

no.	hole diameter	explosive	inclination	rock type	cost (1,000 won)
1	1	1	1	1	9.1
2	1	2	2	2	7.1
3	1	3	3	3	7.4
4	2	1	2	3	8.2
5	2	2	3	1	3.0
6	2	3	1	2	4.8
7	3	1	3	2	4.3
8	3	2	1	3	5.3
9	3	3	2	1	2.7
level 1	7.9	7.2	6.4	4.9	2.4
level 2	5.3	5.1	6.0	5.4	5.8
level 3	4.1	5.0	4.9	7.0	9.9
difference	3.8	2.2	1.5	2.0	

또 비장약량이나 비천공장 또는 이들의 결합으로 결정되는 경제성의 함수가 주어진다면 이를 특성치로 하는 강건설계를 이용하여 인자의 민감도를 구하고 인자수준의 최적 조합을 구할 수 있을 것이다.

Table 5는 발파경비를

$$C = Aq + Bb \quad (\text{원}/m^3) \quad (10)$$

이라고 가정하였을 때의 최적 조건 분석표이다. A와 B는 발파경비에 대한 비장약량과 비천공장의 기여율이며 여기서는 최적화의 가능성만 판단하는 것이므로 각각 10,000원으로 단순화하였다.

표에서 경비에 대한 기여도는 발파공의 직경, 화약의 종류, 암석의 종류 순이며 최적의 조건은 발파공의 직경이 102 mm, 화약류는 Dynamax, 천공경사는 1:1, 암석계수가 0.3일 때이다. 발파공의 직경은 선택조건 가운데서 가장 큰 직경을 채택할 때 가장 경제성이 좋은 것으로 해석된다.

실제에 있어서는 발파경비의 산출식이 식 (10)보다는 훨씬 더 복잡하고 망소특성이므로

$$\eta = -10 \log_{10} k \left[\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right] \quad (11)$$

의 최종통계량을 적용하여야 할 것이다. 여기서는 강건설계에 대한 인자의 최적화 가능성 여부를 검토하기 위하여 단순함수를 사용하여 검토하였고 그 결과 최적화가 가능함을 확인하였다.

5. 결론

스웨덴식 벤치발파 설계방식에 대하여 실험계획법

을 이용하여 인자를 분석하였다. 분석에 사용된 직교 배열은 $L_9(3^4)$ 이었고 변수는 각각 3수준의 값을 갖는 천공직경, 화약의 종류, 공의 경사와 암석계수로 하였다. 또 단순함수를 이용한 가장 경제적인 인자의 최적화 구성 가능성을 검토하였다. 그 결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 최대 및 최소화항선의 결정에 영향을 미치는 인자는 발파공의 직경, 화약의 종류, 암석의 종류 그리고 공의 경사 순이다.
- 2) 비장약량에 영향을 미치는 인자는 암석의 종류, 화약의 종류 순으로 나타났다.
- 3) 비천공장에 영향을 미치는 인자는 발파공의 직경과 화약의 종류 순이었다.
- 4) 비장약량과 비천공장의 단순함수로 이루어진 경제성 검토에서 강건설계를 이용한 최적인자의 선택이 가능함을 확인하였다.

References

1. 김호성, 양형식, 임균택, 전태준, 정창복 역, 1992, 강건설계를 이용한 품질공학 (Phadke MS, Quality Engineering Using Robust Design, AT&T Bell), 민영사, pp. 305.
2. Gustaffson R., 1971, Swedish Blasting Technique, SPI, Gothenburg, Sweden, pp. 57-64.
3. Langefors U. and B. Kihlström, 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley & Sons, New York, pp. 58-59.
4. Olofsson S.O., 2002, Applied Explosives Technology for Construction and Mining(2nd Ed.), Applex AB, Ärla, Sweden, pp. 84-100.



양형식

전남대학교 에너지자원공학과

Tel: 062)530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr