

## 수치해석을 이용한 인공절리 조건에 따른 발파속도 평가

석철기<sup>1)</sup>, 노유송<sup>1)</sup>, 박 훈<sup>1)\*</sup>

### Evaluation of Blast Velocity by Artificial Joint Conditions using Numerical Analysis

Chul-Gi Suk, You-Song Noh, Hoon Park

**Abstract** This study undertakes an evaluation of blast effect through the analysis of the contribution rate and effect that different artificial joint number, artificial joint spacing and artificial joint angle have on blast velocity. Blast velocity according to the different state of the artificial joint was obtained using AUTODYN, a dynamic analysis program. The result of the numerical analysis was subjected to further normalization analysis. For the contribution rate of design factors was analyzed using the robust design method. The orthogonal array used in the analysis was  $L_9(3^4)$  and each parameters were having 3 levels. The result of normalization analysis regarding the artificial joint angle was indicated a tendency in which blast velocity decreased. The result of analyzing blast velocity regarding artificial joint spacing and artificial joint angle was indicated a tendency in which blast velocity decreased as artificial joint spacing increased when the angle was perpendicular. In the case of blast velocity contribution rates they were ranked in the descending order of artificial joint angle, artificial joint number, artificial joint spacing.

**Key words** Artificial joint, Robust design, AUTODYN, Blast velocity

**초 록** 본 연구는 인공절리를 이용한 발파효과 검토를 위해 인공절리 수, 인공절리 간격, 인공절리 경사에 따른 발파속도의 영향 및 기여도를 평가 분석한 연구이다. 인공절리 상태 변화에 따른 발파속도는 동적해석 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 획득하였다. 수치해석 결과에 대해 정규화 분석을 수행하였고, 각 인자의 기여도 분석을 위해 강건설계 실험계획법을 이용하여 설계 인자를 분석하였다. 각 인자는 3수준으로 설정하였고, 분석에 직교 배열표  $L_9(3^4)$ 를 사용하였다. 정규화 분석을 통해 수치해석 결과를 분석한 결과 인공절리 경사가 증가함에 따라 발파속도는 감소하는 경향을 보였다. 또한, 인공절리 간격과 인공절리 경사에 대해 발파속도를 분석한 결과 발파속도는 경사가 수직일 때 인공절리 간격이 증가함에 따라 감소는 경향을 보였다. 강건설계를 이용한 기여율 분석결과 발파속도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 인공절리 경사이며, 이어서 인공절리 수, 인공절리 간격 순으로 기여율이 평가되었다.

**핵심어** 인공절리, 강건설계, AUTODYN, 발파속도

#### 1. 서 론

도시화가 진행됨에 따라 한정된 공간의 효율적인 사용을 위해 주요 사회기반시설들의 지하 매설에 따

른 다양한 지하 공간과 지하교통로가 요구되고 있다. 하지만 도심지 내의 지하 공간 건설을 위한 공사는 비효율적인 측면과 아울러 시공과정 중 진동, 소음으로 인한 주변 건물의 균열, 지반 붕괴, 민원 악화 등의 다양한 문제점을 일으킬 수 있다. 현재 지하 공간 확보를 위해 화약을 이용한 발파공법이 경제성, 시공성 면에서 우수하여 가장 효과적인 공법으로 시행되고 있으나(Berta, 1994), 발파공법은 진동과 소음에 의한 발

<sup>1)</sup> ㈜코리아카코

\* 교신저자 : hujin@jbnu.ac.kr

접수일 : 2017년 11월 30일

심사 완료일 : 2017년 12월 7일

게재 승인일 : 2017년 12월 13일

파공해가 발생하게 되며 이러한 공해는 발파작업을 수행하는 과정에서 큰 제약으로 작용하고 있다(Jung et al., 2011). 이러한 발파공해를 보완하기 위해 최근에는 스무스 블라스팅과 같은 조절발파가 활용되고 있으며(Uysal et al., 2008), 연속적인 인공 자유면이 존재할 때 발파진동과 같은 탄성파는 인공자유면 외부로 전파되지 않고 인공 자유면 내부로 발파진동을 포획하는 원리(Santanarina et al., 2001; Park et al., 2009)를 이용하기 위해 연마재 워터젯 시스템, 와이어-쓰 등을 통해 인공 자유면을 형성 한 후 발파작업을 수행하는 방법(Park et al., 2009; Kim, 2012; Oh et al., 2012; Lee et al., 2015)이 적용되고 있다.

본 연구는 터널 심발부에 인공절리를 적용하여 발파영향을 평가하는 연구 중 기초해석단계로 인공절리를 터널 굴착에 적용하기 위해 단일공 발파 시 발생하는 발파속도에 대해 실험계획법(design of experiments)을 이용하여 각 해석모델을 설정하고, 수치해석을 통해 다양한 인공절리 조건을 통과한 후 동일 지점에서의 발파속도를 산출하였다. 산출된 측정치를 망소특성(smaller is better) 응답으로 하여 인공절리 요소별 기여도를 평가하였다.

## 2. 인자설계

### 2.1 실험계획법

인자의 영향과 기여도를 검토하기 위하여 강건설계법(robust design)을 사용하였다. 강건설계법은 인자

들을 독립적으로 배열한 제한된 수의 실험을 통하여 경우의 수가 엄청나게 많은 실험을 하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있도록 고안된 방법이다. 표 1은 주로 사용되는 직교 배열(orthogonal array)들이다. 표 1에서  $L_8(2^7)$  직교 배열은 2수준 즉 두 가지의 선택이 가능한 인자가 일곱 개 있을 때 가능한 인자의 조합은 128가지이지만 8번의 실험만으로 모든 경우의 수에서 기대되는 결과와 경우에 따라서는 그들 간의 교호작용을 해석할 수 있고 최적의 조건을 찾을 수도 있다. 각 인자의 개별효과와 최적화는 평균분석(Analysis of Mean, ANOM)을 통하여 구할 수 있으며 인자들의 상대적 효과와 민감도는 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 통하여 구할 수 있다. 이러한 분석을 위하여 채택할 최적 통계량은 식 (1)과 같이 정의되며 SN비(signal to noise ratio)로 불린다.

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 측정값의 수,  $Y_i$ 는 측정된 특성값을 나타낸다. 인자 수준의 효과는 전체 평균으로부터 그 인자 수준에 의한 결과의 편차로 정의된다(Yang, 2013).

### 2.2 설계 인자 설정

본 연구에서 터널 심발부에 인공절리를 적용하기 위해 인공절리 수, 인공절리 간격, 인공절리 경사로

표 1. 주로 사용되는 직교 배열 예시

직교 배열	총 경우의 수	실험 수	적요
$L_4(2^3)$	8	4	2수준 3인자
$L_8(2^7)$	128	8	2수준 7인자
$L_9(3^4)$	81	9	3수준 4인자
$L_{12}(2^{11})$	2,048	12	2수준 11인자
$L_{16}(2^{15})$	32,768	16	2수준 15인자
$L_{16}(4^5)$	1,024	16	4수준 5인자
$L_{18}(2^1 \times 3^7)$	4,374	18	2와 3수준 8인자
$L_{25}(5^6)$	15,625	25	5수준 6인자
$L_{27}(3^{13})$	1,594,324	27	3수준 13인자
$L_{32}, L_{36}, L_{50}$ etc.			etc.

표 2. 3수준 설계 인자

수준	인공절리 수(개)	인공절리 간격(mm)	인공절리 경사(°)
Level 1	2	55	45
Level 2	3	110	60
Level 3	4	165	90

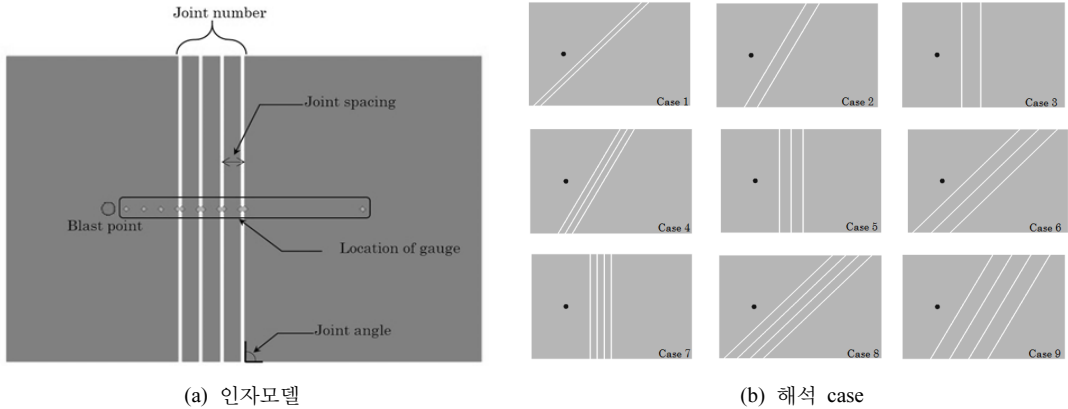


그림 1. 수치해석 인자 모델.

인자를 선택하였다. 발파속도에 대한 요소별 기여도 분석을 위해 선택한 인자 값들은 3수준으로 직교배열  $L_9(3^4)$ 로 설계하였다. 인자 수준은 표 2와 같고, 인공절리의 간격은 와이어 쏘의 절삭 면적인 11mm를 기준으로 5배, 10배, 15배로 설정하였다.

또한, 인공절리 수와 인공절리 경사는 심발부에 적용 가능한 최대치를 고려하여 결정하였다. 발파공과 인공절리의 이격거리는 V-cut에 적용되는 발파공의 장악길이의 중심과 심발부 중심에 인공절리를 형성하였을 때의 거리를 기준으로 선정하였고, 이격거리 220mm로 모든 해석에 동일하게 적용하였다. 그림 1은 수치해석에 사용된 인자 모델 및 전체 해석 case에 대한 모습을 나타낸다. 여기서 검은색 원은 직경  $\phi$  45mm의 발파공이고, 하얀색 간격은 인공절리이다. 직교배열표에 따라 총 9회 해석을 수행하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 적용물성

Riedel 등에 의해 정립된 RHT(Reidel-Hermaier-Thoma) 콘크리트 모델은 일반적인 취성재료를 분석

하기 위한 모델이다. RHT 콘크리트 모델은 AUTODYN, LS-DYNA와 같은 프로그램에서 암석과 같은 취성재료의 물성 모델로 사용되고 있다. RHT 모델은 동적하중을 받는 콘크리트의 모델링에 특히 유용하다. 또한, 암석이나 세라믹 등 콘크리트 이외의 암석과 같은 취성재료를 모델링 하는 데도 사용되며, 압력 경화, 변형률 경화, 변형률 속도 경화, 손상에 따른 변형률 연화 및 전단강도 감소의 영향을 고려하고 있다 (Riedel et al, 1999). 암반은 화강암의 물성을 적용하였고, 그 물성값은 표 3과 같다. 인공절리 구간에는 공기를 모델링 하였다. 공기의 대기조건 부여를 위해 내부에너지를 표준대기 조건인  $2.068 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 을 적용하였고, 이상기체 상태방정식을 사용하였다. 해석에 적용한 폭약은 AUTODYN Library에 있는 ANFO를 사용하였고, 물성값은 표 4와 같다.

#### 3.2 해석 조건 및 해석 결과

수치해석은 AUTODYN을 이용하여 해석하였다. 라그랑지 솔버(lagrange solver)를 적용하여 암반을 형성하였고, 암반의 외부 경계는 무한한 영역을 위해 transmit 경계조건을 부여하였다. 인공절리 구간을 통

표 3. 암반 적용 물성(Riedel et al., 1999)

Parameter	Value	Parameter	Value
Reference density	2.75(g/cm <sup>3</sup> )	Shear modulus, G	2.206×10 <sup>4</sup> (MPa)
Porous density	2.52(g/cm <sup>3</sup> )	Compressive strength, f <sub>c</sub>	93.75(MPa)
Porous sound speed	3.242×10 <sup>3</sup> (m/s)	Tensile strength, f <sub>t</sub> / f <sub>c</sub>	0.100
Initial compaction pressure	93.30(MPa)	Shear strength, f <sub>s</sub> / f <sub>c</sub>	0.180
Solid compaction pressure	6.000×10 <sup>3</sup> (MPa)	Intact failure surface constant, A	1.600
Compaction exponent	3.000	Intact failure surface exponent, N	0.610
Bulk modulus, A <sub>1</sub>	3.527×10 <sup>4</sup> (MPa)	Tens./Comp. meridian ratio, Q <sub>2,0</sub>	6.805×10 <sup>-1</sup>
Parameter, A <sub>2</sub>	3.958×10 <sup>4</sup> (MPa)	Brittle to ductile transition, BQ	1.050×10 <sup>-2</sup>
Parameter, A <sub>3</sub>	9.040×10 <sup>2</sup> (MPa)	G(elastic)/G(elastic-plastic)	2.000
Parameter, B <sub>0</sub>	1.220	Elastic strength / f <sub>t</sub>	0.700
Parameter, B <sub>1</sub>	1.220	Elastic strength / f <sub>c</sub>	0.530
Parameter, T <sub>1</sub>	3.527×10 <sup>4</sup> (MPa)	Residual strength constant, B	1.600
Parameter, T <sub>2</sub>	0.000(MPa)	Residual strength exponent, M	0.610
Reference temperature	300(K)	Compressive strain rate exponent, α	9.090×10 <sup>-3</sup>
Specific heat	6.540×10 <sup>2</sup> (J/kgK)	Compressive strain rate exponent, δ	1.250×10 <sup>-2</sup>
Thermal conductivity	0.000(J/mKs)	Max. fracture strength ratio	1.000×10 <sup>20</sup>

표 4. ANFO의 폭약 특성값(JWL, C-J)

A(GPa)	B(GPa)	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω
49.46	1.891	3.907	1.118	0.333

과한 후 발파속도는 각 인공절리 구간 전 후에 게이지를 설치하여 인공절리 구간 통과에 따른 경향을 파악하였고, 분석에 사용한 특성치인 발파속도는 모든 인공절리 구간을 통과한 후 발파원과 동일한 위치의 게이지에서 획득하였다.

해석결과 발생된 발파압력은 그림 2와 같이 인공절리 구간에 도달할 때 반사 인장파가 발생하였으며, 발파압력 전파는 해석이 진행됨에 따라 인공절리 구간이 폐합되어 다음 암반 요소에 접촉하였을 때 발생하였다. 인공절리 경사에 따라 발파원과 수직이 되는 인공절리 구간에 대해 최초로 발파압력이 전파되었으며, 그 구간에서 반사 인장파 및 압력 전파가 발생하였다. 그림 3은 각 case 별 발파속도 시간이력곡선으로 발파속도는 인공절리 구간을 통과 할 때 감쇠가 발생함을 확인하였다. 특히 case 3, case 5, case 7은 인공절리 경사가 90°로 인공절리의 직접적인 폐합에 의해 발파속도의 감쇠가 두드러졌다. 인공절리 간격이

클수록 발파속도의 지속시간이 증가하였고, 인공절리 구간을 통과할수록 발파속도가 감소하여 발파속도의 지속시간이 증가하는 경향을 확인하였다.

그림 4는 하나 및 두 개의 인공절리 구간을 통과한 발파속도를 인공절리 경사 및 인공절리 간격에 대해 정규화한 그래프이다. 정규화의 범위는 0~1이며, 사용된 식은 식(2)와 같다.

$$Y' = \frac{Y - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \quad (2)$$

여기서, Y는 입력값, Y<sub>max</sub>는 입력값 중 최대값, Y<sub>min</sub>는 입력값 중 최소값이다.

해석결과 인공절리 경사가 증가함에 따라 발파속도는 감소하는 경향을 보였고, 인공절리 간격과 인공절리 경사로 발파속도를 분석한 결과 인공절리 경사가 수직일 경우 인공절리 간격이 클수록 발파속도는 감

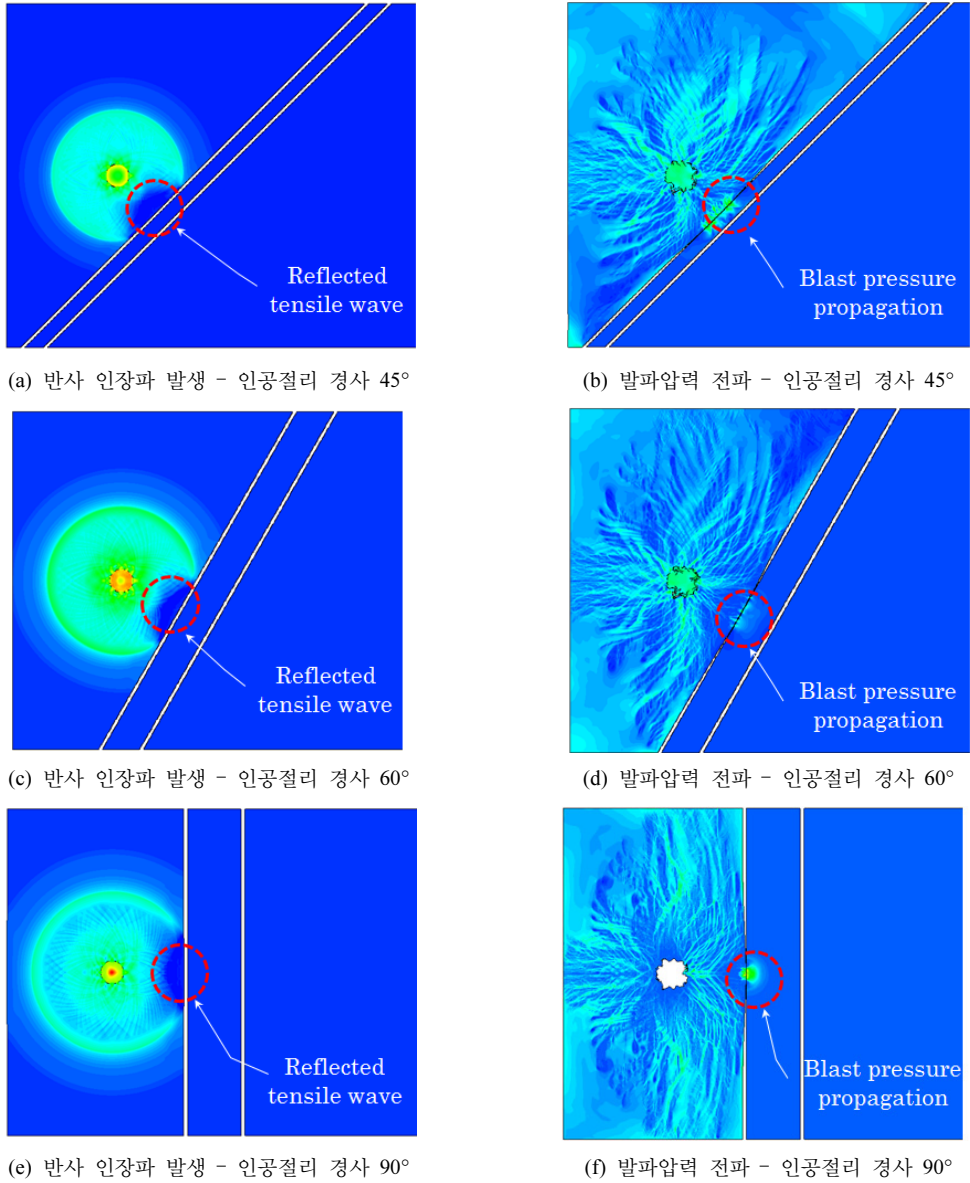


그림 2. 인공절리 경사 별 반사 인장파 발생 및 발파압력 전파.

소하는 경향을 보였으며, 인공절리 경사가 45°일 경우 인공절리 간격이 좁을수록 발파속도가 감소하는 경향을 보였다. 인공절리 경사 60°일 경우 인공절리 간격이 클수록 발파속도는 감소하다가 인공절리 간격 110mm를 기준으로 발파속도가 증가하는 경향을 보였다.

평균분석 및 분산분석에 사용된 최대 발파속도 측

정치는 발파원으로부터 동일 위치의 게이지에서 산출하였고, 그 결과는 표 5와 같다.

#### 4. 결과 분석

본 연구에 적용한 강건설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대

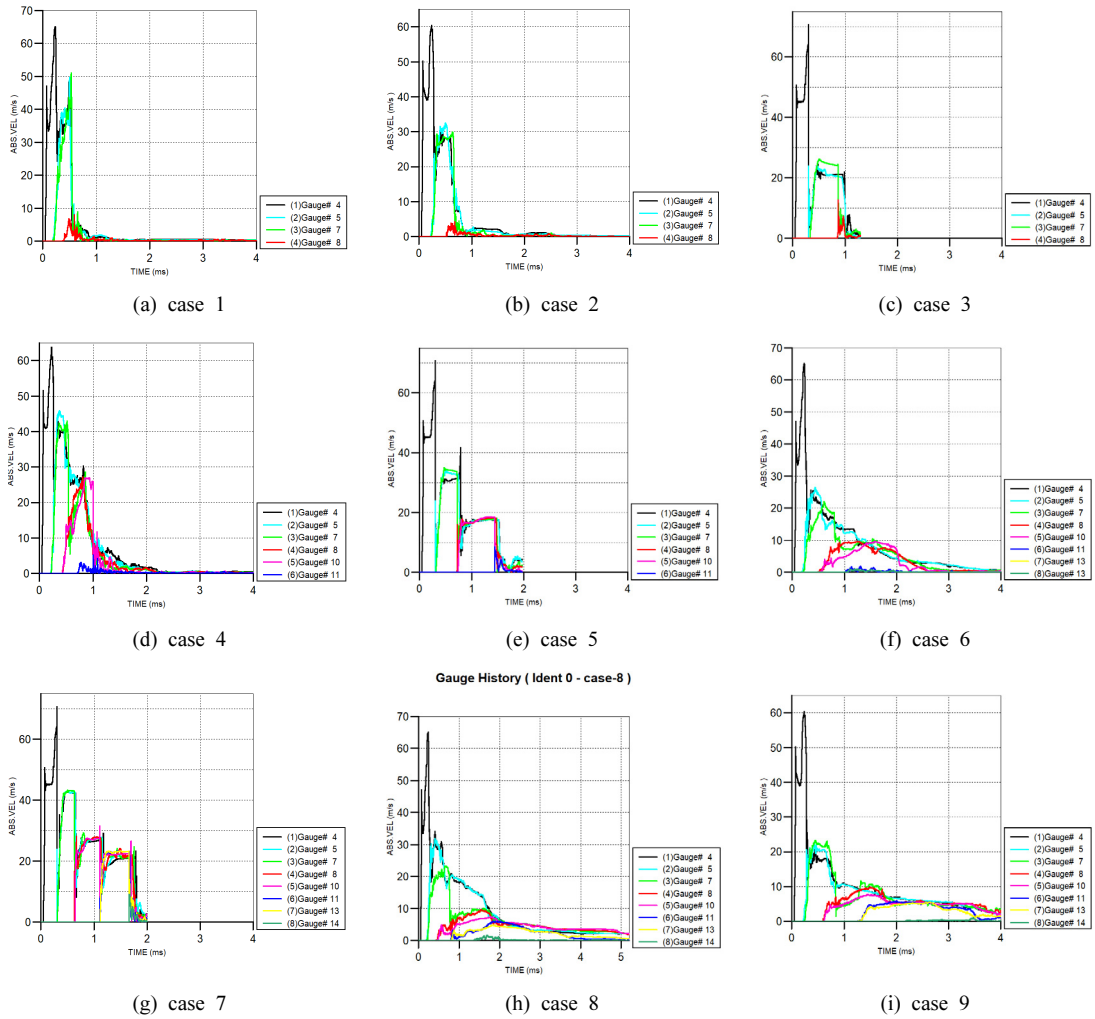


그림 3. 발파속도에 대한 시간이력곡선.

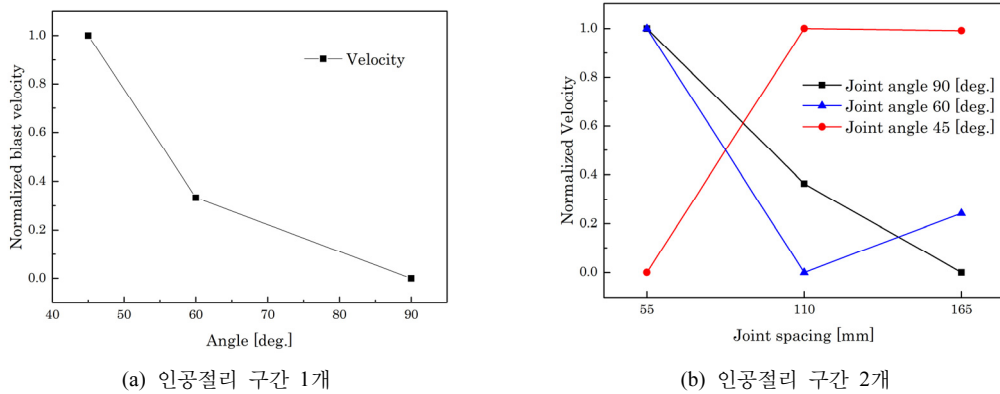


그림 4. 정규화 분석 결과.

표 5. 최대 발파속도 해석 결과

Case	인공절리 수	인공절리 간격	인공절리 경사	최대 발파속도(m/s)
1	1	1	1	2.1030
2	1	2	2	1.2994
3	1	3	3	3.3555
4	2	1	2	1.3952
5	2	2	3	2.3690
6	2	3	1	1.0823
7	3	1	3	1.8669
8	3	2	1	1.0002
9	3	3	2	1.0035

표 6. 수치해석 결과의 SN비

Case	인공절리 수	인공절리 간격	인공절리 경사	발파속도 SN비
1	1	1	1	-6.4570
2	1	2	2	-2.2749
3	1	3	3	-10.5151
4	2	1	2	-2.8927
5	2	2	3	-7.4913
6	2	3	1	-0.6870
7	3	1	3	-5.4224
8	3	2	1	-0.0017
9	3	3	2	-0.0304
평균				-3.9747

로 하여 잡음의 영향력을 최소화 하는 것이다. 품질을 강건하게 유지하기 위해 SN비를 사용한다. SN비는 신호대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호의 입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로서 나타낸다. 즉, 각각의 조절인자의 SN비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해 진다. SN비는 목적 함수, 즉 특성치에 의해 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(normal is best), 망소(smaller is better), 망대(larger is better) 특성으로 나뉜다(Baek and Kim, 2002). 본 연구에서 특성치인 발파속도는 작을수록 좋기 때문에 망소 특성을 적용하였으며, 식 (1)에 의해 계산되고 그 결과는 표 6과 같다.

최적 수준을 찾기 위해 발파속도의 SN비를 이용하여 평균분석과 분산분석을 수행하였다. 평균 분석은 예를 들어 A인자, 수준 1의 평균 SN비는 case 1, 2,

3에 해당하는 SN비의 평균으로 계산된다. 이와 같은 방법으로 모든 인자와 수준에 대한 효과를 계산할 수 있다. 한편 분산분석은 각 인자에 대해 식 (3)을 이용하여 제곱 합을 계산한다.

$$\text{Sum of Squares} = 3(m_1 - m)^2 + 3(m_2 - m)^2 + 3(m_3 - m)^2 \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 총 SN비의 평균,  $m_1 \sim 3$ 은 각 인자의 수준별 평균 SN비이다. 계산된 제곱 합을 각 인자의 자유도(인자 수준 - 1)로 나눠 제곱 평균을 구한다. 제곱 평균의 총합과 인자별 제곱 평균 비를 이용하여 각 인자의 기여도를 평가한다. 발파속도의 해석결과는 표 7과 같다. 그림 5는 각 인자의 수준별 SN비를 나타낸 것으로 발파속도를 최소화 하는 최적 인자는 인공절리 수 4개, 인공절리 간격 110mm, 인공절리 경

표 7. SN비 수준에 따른 발파속도 인자 분석 결과

인자	level 1	level 2	level 3	편차	자유도	제곱 합	제곱 평균	기여도(%)
인공절리 수	-6.416	-3.690	-1.818	4.598	2	32.077	16.0385	31.05
인공절리 간격	-4.924	-3.256	-3.744	1.668	2	4.413	2.2065	4.27
인공절리 경사	-2.382	-1.733	-7.810	6.077	2	66.814	33.407	64.68

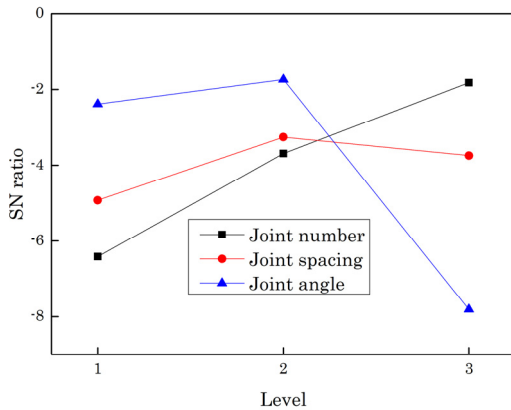


그림 5. 각 수준에 따른 SN비.

사 60°이며, 기여도 분석 결과 발파속도에 영향을 미치는 인자는 인공절리 경사 64.68%, 인공절리 수 31.05%, 인공절리 간격 4.27% 순으로 평가되었으며, 평가 결과 인공절리 경사가 발파속도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

매질 차이에 의한 발파속도의 영향을 AUTODYN으로 수치해석을 하였고, 강건설계 실험계획법을 이용하여 인공절리의 요소별 최적조건 및 기여도를 평가하였다. 분석에 사용된 직교 배열은  $L_9(3^4)$ 를 선택하였으며, 변수는 각각 3수준의 값을 갖는 인공절리 수, 인공절리 간격, 인공절리 경사로 하였다.

수치해석 결과는 정규화, 평균분석 및 분산분석을 통해 분석하였다. 정규화를 이용해 수치해석을 분석한 결과 인공절리 경사가 증가함에 따라 발파속도는 감소하는 경향을 보였고, 인공절리 간격과 인공절리 경사에 따라 분석한 결과 경사가 수직일 때 인공절리 간격이 증가함에 따라 발파속도가 감소하는 경향을 보였다. 평균분석 및 분산분석 결과 발파속도에 가장

큰 영향을 미치는 요소는 인공절리 경사였으며, 이어서 인공절리 수, 인공절리 간격으로 평가되었으며, 발파속도가 최소가 되는 최적 조합은 인공절리 수 4개, 인공절리 간격 110mm, 인공절리 경사 60°로 평가되었다. 이는 측정 지점에서 직접적인 인공절리면의 폐합이 발생하지 않은 영향으로 판단된다.

## 감사의 글

“본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17CTAP-C130130-01).”

## 참고문헌

- Baek, N. K. and D. E. Kim, 2002, Optimization of Laser Lithography Micropatterning Technique based on Taguchi Method, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol, 19, No. 7, pp. 59-63.
- Berta, G., 1994, Blasting-induced vibration in tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 175-187.
- Jung, H. S., K. S. Jung, H. N. Mun, B. S. Chun and D. H. Park, 2011, A Study on the Vibration Propagation Characteristics of Controlled Blasting Methods and Explosives in Tunnelling, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 12, No. 2, pp. 5-14.
- Kim, J. G., 2012, Reduction of blasting-induced vibration in tunnelling using abrasive water jet notch and disc cutting, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
- Lee, J. H., S. K. Ahn, K. C. Lee, C. S. Bang and M. Sagong, 2015, Study on a Wire Saw Rock Cutting Model for Tunnel Excavation and Cutting Performance Improvement, Transactions Korean Society of Mechanical Engineering A, Vol. 39, No. 10, pp. 1069-1077.
- Oh, T. M., G. C. Cho, K. I. Song and I. T. Ji 2012, A new rock excavation method using an abrasive waterjet to minimized excavation damaged zone, Proceedings of World Tunnel Congress 2012, Bangkok, Thailand, pp. 340-341.



7. Park, D. H., B. K. Jeon and S. W. Jeon, 2009, A numerical study on the screening of blast-induced waves for reducing ground vibration, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, pp. 449-473.
8. Riedel, W., K. Thomas, S. Hiermaier and E. Schmolinske, 1999, Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes, 9<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, Germany, pp. 315-322.
9. Santamarina, J. C., K. A. Klein and M. A. Fam, 2001, Soils and Waves, Wiley, New Jersey pp. 448.
10. Uysal, O., K. Erarslan, M. A. Cebi and H. Akcakoca, 2008, Effect of Barrier Holes on Blast Induced Vibration, Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 45, No. 5, pp. 712-719.
11. Yang, H. S., 2013, Parameter Analysis of Swedish Bench Blast Design using Robust Design, Explosives & Blasting, Vol. 31, No. 2, pp. 1-5.



**석 철 기**

(주)코리아카코 대표이사

Tel: 02-834-4590  
E-mail: kacoh@hanmail.net



**노 유 송**

(주)코리아카코 연구원

Tel: 02-834-4590  
E-mail: nomoosong1@naver.com



**박 훈**

(주)코리아카코 책임연구원

Tel: 02-834-4590  
E-mail: hujin@jbnu.ac.kr