손상대를 고려한 암반사면 안정성 평가 및 인자분석

김진수, 권상기*, 천대성, 박의섭

Assessment of Rock Slope Stability and Factor Analysis
with a Consideration of a Damaged Zone

Jin-Soo Kim, Sangki Kwon*, Dae-Sung Cheon, Eui-Seob Park

Abstract After excavation or blasting, rock properties within an excavation damaged zone can be perpetually weakened on account of stress redistribution or blasting impact. In the present study, the excavation damaged zone is applied to a rock slope. The objective of this research is to compare the mechanical stability of the rock slope depending on the presence of the damaged zone using 2-dimensional modeling and analyze factors affecting factor-of-safety. From the modeling, it was founded that the mechanical stability of the rock slope is significantly dependent on the presence of the damaged zone. In particular, factor-of-safety with a consideration of the damaged zone decreased by approximately 49.4% in comparison with no damaged zone. Factor analysis by fractional factorial design was carried out on factor-of-safety. It showed that the key parameters affecting factor-of-safety are angle of the slope, cohesion, internal friction angle and height.

Key words Damaged Zone, Mechanical Stability, Factor-of-safety, Design of Experiment, Fractional Factorial Design

초 록 굴착 또는 발파 후 암반손상대 내 암반 물성은 응력재분배나 발파충격에 의해 영구히 약화된다. 본 논문에서는 이러한 암반손상대를 사면에 적용하였다. 손상대 유·무에 따라 2차원 모델링을 통해 암반사면의 역학적 안정성을 비교하고 안전율에 영향을 미치는 인자를 분석하는 것이 본 연구의 목적이다. 모델링 결과 사면의 역학적 안정성은 손상대 유·무에 따라 현저하게 차이가 있었다. 특히 손상대를 고려한 안전율은 고려하지 않을 때보다 약 49.4%가 감소하였다. 부분요인설계법을 이용하여 안전율에 관한 인자 분석을 실시한 결과 안전율에 영향을 미치는 주요 인자는 사면 경사, 점착력, 내부마찰각, 높이였다.

핵심어 손상대, 역학적 안정성, 안전율, 실험계획법, 부분요인설계법

1. 서 론

굴착 또는 발파 작업은 충격과 진동으로 인해 암반의 응력재분배를 발생시키고 충격과 진동을 받은 암반은 역학적, 수리적 물성이 영구적으로 변하게 된다. 이러한 구간을 암반손상대(Excavation Damaged Zone, EDZ)

라고 정의한다. 캐나다를 비롯한 선진국들은 자국의 지하연구시설에서 EDZ에 관한 현장 및 실내시험을 통해 EDZ내에서의 물성변화, EDZ 크기 등을 평가하였다(Sato et al., 2000, Bossart et al., 2002, Martino and Chandler, 2004, Cai and Kaiser, 2005, Lai et al., 2006, Malmgren et al., 2007, Saiang and Nordlund, 2008, Ericsson et al., 2009, Saiang, 2011). 스웨덴 Äspö HRL (Hard Rock Laboratory)에서 수행된 ZEDEX(Zone of Excavation Disturbance EXperiment) 프로젝트에 의하면 EDZ는 굴착 후 주변 암반의 비가역적인 변화가 현저하게 발생한다고 설명하였다(Bauer and Hommand, 1996, Emsley et al., 1997). 비가역적이란 소성변형의 발생으로 수리전도도 증가, 변형계수 감소와 같은 변화가 영구적으로 발생함을 의미한다(Bäckblom and Martin,

Received: Apr. 18, 2014

Revised: Apr. 22, 2014

Accepted: Jun. 11, 2014

*Corresponding Author: Sangki Kwon

Tel) +82328607554, Fax) +82328727550

E-Mail) kwonsk@inha.ac.kr

Department of energy resources engineering, Inha University,
100 Inharo, Nam-gu, Incheon, Korea

(a) Young's modulus (Kwon and Cho, 2008)

(b) P-wave velocity (Lee et al., 2011)

Fig. 1. Effect of the EDZ on Young's modulus and P-wave velocity of rock at KURT

Table 1. EDZ size at KURT (Lee, 2012)

Site	Rock type	Excavation method	Measurement method	EDZ size (m)
KURT	Granite	Blasting	Rock core observation	2.0
			Goodman jack test	2.3
			Porosity	2.4
			P-wave velocity	1.1
			S-wave velocity	1.3
			Young's modulus	1.3
			UCS	1.1
			Thermal conductivity	1.8

1999). ZEDEX는 프랑스의 ANDRA(The National Radioactive Waste Management Agency)와 영국의 NIREX Limited, 스웨덴의 SKB(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)에 의해 시행된 국제 공동 프로젝트이다. ZEDEX 프로젝트를 통해 굴착된 공간 주변 암반에서는 대부분의 역학적, 수리적 물성이 현저하게 변화했다는 것이 밝혀졌다. 또한 EDZ는 공동 반경 절반 이하의 범위에서 제한적으로 나타나고 암석 종류와 현지 응력, 굴착 방법에 따라 물성변화 폭과 크기가 다르게 나타남을 알 수 있었다.

국내에서는 대전에 위치한 한국원자력연구원(KAERI) 내 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)에서 현장 및 실내시험을 통해 EDZ를 정량적으로 평가하였다(Kwon and Cho, 2008, Kim et al., 2009, Lee et al., 2011). Fig. 1은 손상구간 내에서 발파 전과 후 탄성계수, P-파 속도가 거리에 따라 비선형적으로 감소하였음을 보여준다. Table 1은 현장 및 실내시험을 통해 EDZ 크기를 정량적으로 평가한 표이다. 한편, Kim

and Kwon(2014)은 수치 모델링을 통해 터널 주변의 안정성을 비교·분석한 결과 EDZ 유·무에 따라 역학적 안정성이 많은 차이가 나타남을 보였다. 또한 민감도 분석을 통해 EDZ 구간에서의 물성감소비(reduction ratio)가 터널 주변 안전성에 많은 영향을 미칠 수 있으며 측압계수와 EDZ 크기(EDZ size)와의 조합으로 발생하는 효과가 안전율에 큰 영향을 미치지 때문에 터널 설계 시 EDZ를 고려하는 것은 필요하다고 보고하였다.

본 논문에서는 암반사면을 대상으로 굴착 또는 발파 후 발생하는 EDZ의 영향을 평가하기 위해 모델링을 구현한 후 안전율을 비교하였다. 또한 안전율에 영향을 미치는 여러 인자들을 설정하고 실험계획법의 한 종류인 부분요인설계법(Fractional Factorial Design)을 이용해 관련 인자들의 영향을 분석하였다.

2. 사면 손상대 연구 사례

암반사면의 안정성은 불연속면의 존재, 풍화의 정도,

지하수, 상부사면의 하중증가, 굴착 및 발파 등과 같은 많은 요소와 관계가 있다. 불연속면은 암반의 안정성 해석에 중요한 요소로 종류도 다양하고 정확하게 파악하기 쉽지가 않다. 암석이 풍화작용을 받으면 강도저하나 불연속면의 마찰 저항력의 감소가 발생한다. 암반 내에 존재하는 지하수는 유효응력(effective stress)과 전단강도를 감소시키고 절리면 내에 충전되어 있는 지반재료의 강도를 저하시킨다. 상부사면의 구조물 축조 등과 같은 하중 증가는 전단력의 증가로 전도를 촉진시키게 된다. 이와 함께 사면의 굴착에 따른 암반손상구간의 발생 또한 사면의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 발파 또는 기계식 굴착에 의해 형성되는 사면에서는 굴착과정에서의 발파 충격과 진동 및 응력재분배에 의해 기존의 균열 확장 및 새로운 균열 생성, 균열간극의 변화 등을 야기할 수 있다. 암반사면에 발생하는 손상대는 암반 물성의 약화를 가져오며 이는 사면의 안정성에 영향을 줄 것으로 판단된다.

암반손상대는 터널, 지하 갱도, 지하 저장소뿐만 아니라 사면 등 발파에 의해 굴착되는 암반 주변에서 나타나며 손상대의 규모 및 물성 변화는 암반 특성, 굴착 방법, 발파 기법, 심도, 현지응력, 공동의 형상과 크기, 지보시스템, 불연속면 등에 따라 다르게 발생한다. Goodman and Kieffer(2000)는 사면이 지하 공동에 비해 낮은 현지응력 상태, 암석의 풍화, 활발한 지하수 영역의 영향을 받게 되며 지표굴착의 경우, 일반적으로 지하굴착보다 훨씬 더 많은 부피의 암반을 제거하기 때문에 지하 공동 환경보다 훨씬 더 불안정 하다고 보고한 바 있다. 결과적으로 지표굴착으로 발생한 EDZ는 지하굴착으로 인한 EDZ보다 훨씬 더 규모가 크고 복잡할 수도 있다고 설명하였다.

Fig. 2. Typical distribution of the EDZ in permanent shiplock slopes of TGP in China (Sheng et al., 2002)

한편, Sheng et al.(2002)는 중국 양쯔강의 Three Gorges Project(TGP) 대수로 사면에서 발생한 EDZ를 물성 감소폭에 따라 3가지 영역으로 구분하였다. 사면 표면과 가장 근접하고 굴착 후 물성 변화가 상당히 많이 감소한 영역을 ‘손상대(Damaged zone)’, 사면 표면으로부터 조금 떨어지고 굴착 후 물성 변화가 적당히 감소한 영역을 ‘영향대(Affected zone)’, 사면 표면으로부터 가장 멀리 떨어지고 굴착 후 물성 변화가 거의 없는 영역을 ‘약영향대(Slightly affected zone)’로 정의하였다. Fig. 2는 이러한 설명을 도식적으로 보여준다. Table 2는 여러 현장 시험을 통해 얻어진 물성을 정량화하여 각 영역을 구분한 표이다. Fig. 3는 Sheng et al.(2002)의 연구에서 보고된 TGP 대수로 사면에서 시행된 평판재하 시험과 탄성과 시험의 결과로 사면 지표로부터 거리에 따른 변형계수와 P-파 속도 변화를 보여준다. 변형계수와 P-파 속도 모두 거리에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

Deng et al.(2001) 역시 TGP에서 시추공 자료를 분

Table 2. Properties of damaged zone, affected zone and slightly affected zone of the EDZ (Sheng et al., 2002)

Investigation	Damaged zone	Affected zone	Slightly affected zone
Joint opening	Ratio of open joints>50%, or ratio of open joints>50% and separation>0.5 mm	30%<ratio of open joints≤50%, or ratio of open joints≤50% and separation>0.5 mm	Ratio of open joints≤30% and separation≤0.5 mm
Cross-hole velocity	Acoustic velocity ≤ 4000 m/s	4000m/s<Acoustic velocity≤5000 m/s	Acoustic velocity>5000 m/s
	Seismic velocity ≤ 3500 m/s	3500m/s<Seismic velocity≤4500 m/s	Seismic velocity>4500 m/s
Borehole deformation modulus	$E \leq 25$ GPa	$25 \text{ GPa} < E \leq 35 \text{ GPa}$	$E > 35 \text{ GPa}$
Deformation modulus from plate loading test	$E \leq 20 \text{ GPa}$	$20 \text{ GPa} < E \leq 30 \text{ GPa}$	$E > 30 \text{ GPa}$

Fig. 3. Variation of deformation modulus and P-wave velocity with distance from slope surface at TGP site in China (Sheng et al., 2002)

Table 3. Elastic modulus statistics for the damaged and undamaged zone at TGP site in China (Deng et al., 2001)

Borehole No.	2905	2906	2907	2908
Mean elastic modulus in the damaged zone (GPa)	23.5	32.5	33.0	29.8
Mean elastic modulus in the undamaged zone (GPa)	37.1	37.0	37.3	37.8
Decrease in elastic modulus (%)	31.3	12.3	11.5	21.0

Table 4. P-wave velocity statistics from seismic wave penetration tests conducted between boreholes for the damaged and undamaged zone at TGP site in China (Deng et al., 2001)

Borehole No.	2905-2906	2906-2907	2907-2908	Mean
Mean P-wave velocity in the damaged zone (GPa)	3166	3479	3095	3206
Mean P-wave velocity in the undamaged zone (GPa)	4782	5245	4950	4997
Decrease in P-wave velocity (%)	33.8	33.7	37.5	35.8

Fig. 4. Acoustic wave velocity test results before and after excavation at a different elevation of the left bank slope at Jinping- I hydropower station in China (Zhou et al., 2014)

석하여 손상 구간에서 발생하는 P-파 속도와 탄성계수 변화를 정량적으로 제시하였다. 이들의 보고에 따르면 Table 3과 Table 4에서 보듯이 손상되지 않은 영역과 비교하여 P-파는 약 34~38%가 감소하였고 탄성계수

는 약 12~31%가 감소하였다.

Zhou et al.(2014)는 중국 Jinping-I 수력발전소 left bank 사면에서 음파속도 시험을 통해 손상대를 평가하였다. Fig. 4는 다른 높이에서 측정한 음파속도 변화를

(a) rock grade III

(b) rock grade IV

Fig. 5. Comparisons of sonic wave velocity before and after excavation for different types of rock grade of the high rock slope at Xiluodu hydropower station in China (Lu et al., 2013)

보여준다. 두 장소 모두 굴착 전보다 굴착 후 음파속도는 감소하였고, 굴착 후 지표로부터 깊이가 3.1m, 3.6m 지점에서 음파속도가 급격히 감소한 것으로 보아 손상대의 크기 예측이 가능하였다.

Lu et al.(2013)은 중국 Xiluodu 수력발전소 암반사면에서 음파속도 시험을 이용해 암반등급에 따라 굴착 전·후 음파속도를 비교하였다. Fig. 5에서 보듯이 전반적으로 굴착 전보다 굴착 후 음파속도는 감소하였으며 등급이 낮은 암반이 더 많은 감소변화가 나타났음을 알 수 있다.

Choi et al.(2006)는 인도네시아 Pasir 노천탄광 사면에서 발파 후 손상영역이 발생할 확률이 매우 높으므로 지속적인 발파진동을 받거나 강우에 의한 침수가 발생하게 되면 다양한 사면파괴가 발생할 가능성이 커진다고 보고하였다. Kang et al.(2006)는 탄성과 검층법을 이용하여 석회석 광산 잔벽 사면의 손상대를 평가할 수 있다고 보고한 바 있다.

3. 수치 모델링

3.1 모델링 개요

사면 안정성 해석을 위한 기법 중 하나인 수치해석을 이용한 방법은 연속체 해석과 불연속체 해석을 이용하는 방법이 있다. 연속체 해석은 유한요소법(FEM) 또는 유한차분법(FDM)과 같은 수치해석 기법을 사용하여 불연속면을 implicit하게 고려하여 암반을 균질한 연속체로 간주하고 해석하는 방법이다. 대표적인 수치해석 프로그램은 유한차분 코드인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)이 있다. 반면 불연속체 해석은 불연속면을 explicit하게 고려하여 암반을 블록으로 된 불연속체로 간주하여 평가하는 방법이다. 대표적으로 개별요소법(DEM)인 UDEC(Universal Distinct Element Code)이 있다. 개별요소해석은 단순한 기하학적 해석 방법인 평사투영도법이나 하나의 파괴면에 대한 검토만이 가능한 한계평형법 등의 단점을 보완하여 파괴 거동을 알

Fig. 6. Model mesh, geometry of the slope and boundary condition

아낼 수 있다.

본 논문에서는 모델링 해석을 위해 유한차분 해석 코드인 FLAC을 이용하여 연속체 해석을 수행하였다. 사면의 경사는 60°, 높이와 손상대 크기는 각각 50m, 5m로 구현하였다. Fig. 6은 모델 격자망(mesh)과 경계조건을 보여준다. 손상대가 발생한 지표 근처 격자망을 미세하게 모사하여 정밀 분석이 가능하도록 하였다. 구성모델은 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 모델이고 전체 암반을 균질, 등방성으로 가정하였다. 지표면을 제외하고 바닥면과 측면부는 수직방향 변위를 고정하였다.

3.2 암반과 손상대 물성

손상대가 사면 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 사면을 3가지 형태로 구분하였다. 손상대를 고려하지 않은 A 타입, 손상대가 존재하고 균등한 물성감소를 가정한 B 타입, 손상대가 존재하고 불균등한 물성을 갖는 사면을 C 타입으로 정의하였다. B 타입의 물성감소비(reduction ratio)를 0.5로 설정하여 A 타입과 C 타입을 좀 더 명확하게 구분하도록 하였다. C 타입은 사면의 지표면에서부터 거리에 따라 90%에서

Fig. 7. Types for the mechanical stability of a slope with a consideration of a damaged zone

Table 5. Material properties used for the slope analysis

	Density (kg/m ³)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)	Tensile strength (kPa)	Comment
A type	2600	2.63	1.22	0.44	30.0	70	Yang et al. (2005)
B type	2470	1.32	0.61	0.22	15	35	Uniform damaged zone properties
C type	2574	2.37	1.10	0.40	27	63	Non-uniform damaged zone properties
	~ 2366	~ 0.26	~ 0.12	~ 0.04	~ 3	~ 7	

10%까지 점진적으로 감소하는 것으로 가정하였다. 앞서 설명한 Fig. 3~5에서 보여준 지표면에서부터 거리에 따른 암반물성의 비선형적인 감소 변화는 C 타입의 근거 자료로 활용할 수 있다.

Table 5는 사면 해석에 사용된 암반과 손상대의 입력 물성을 보여준다. A 타입은 암반 물성을 그대로 적용하였고 B 타입은 암반 물성을 절반으로 감소시켰다. 밀도는 감소폭이 미미할 것으로 판단되어 5%만 감소시켰다. C 타입은 지표면에서부터 거리에 따라 90%에서 10%까지 감소시켰으며 밀도는 9%에서 1%까지 감소시켰다. 실제로 Kwon and Cho(2008)의 보고서에 따르

면 KURT에서 실시한 현장시험에서 EDZ내 밀도 변화는 약 5% 이하의 미미한 감소를 보였다. 굴착면에서부터 거리에 따라 물성을 감소시키는 과정에서 다소 비현실적인 값이 입력될 수는 있지만 손상대가 고려된 사면과 손상대가 존재하지 않는 사면과의 안정성 평가 비교와 인자 분석을 위해 이러한 물성변화를 적용하였다.

3.3 모델링 결과

사면 지표면에서의 최대·최소주응력 그래프와 모델 사면의 contour를 Fig. 8~10에, x방향, y방향 변위 그래프와 모델 사면의 contour를 Fig. 11~13에 나타내었

Fig. 8. Variation of major and minor principal stress at a slope surface

Fig. 9. Contour of major principal stress for each type

Fig. 10. Contour of minor principal stress for each type

Fig. 11. Variation of displacement at a slope surface

Fig. 12. Contour of x-displacement for each type

Fig. 13. Contour of y-displacement for each type

Table 6. Factor-of-safety and ratio of decrease

A type	B type	C type	Ratio of decrease between A and B type (%)	Ratio of decrease between A and C type (%)
2.51	2.34	1.27	6.77	49.40

다. 안전율을 변화는 Table 6에 나타내었다. 그래프의 X 축은 Fig. 6을 참고하면 알 수 있듯이 하부 바닥면부터 상부 바닥면까지 그리드 포인트를 의미한다. 최대주응력은 A, B, C 타입 순으로 많은 응력이 작용하였으며 그 차이는 사면의 상부 바닥면에서 가장 크게 나타났다. A 타입에 비해 B 타입은 약 38.3%, C 타입은 약 86.0%가 감소하였다. 최소주응력의 변화는 타입에 따라 규칙이 없었고 대부분 0Pa의 값이 나타났다. x방향 변위는 A타입에 비해 B, C 타입에서 변위가 증가하였고 하부 비탈면에서 가장 많은 변화가 일어났다. y방향 변위도 A타입에 비해 B, C 타입에서 변위가 증가하였으며 하부 바닥면에서 가장 많은 변화가 나타났다. 전체 변위 증가율은 A 타입을 기준으로 B 타입은 약 30.7%, C 타입은 239.6%였다.

FLAC에서는 안전율 계산을 위해 강도감소기법을 이용한다. 강도감소기법은 일반적으로 사면이 한계 평형 상태에 도달할 때까지 전단강도를 점진적으로 감소시킴으로써 안전율을 계산하는 방법이다(Itasca, 2011). Table 6에서 보듯이 A, B, C 타입은 각각 2.51, 2.34, 1.27로 A 타입을 기준으로 B 타입은 6.77%, C 타입은 49.40%가 감소하였다.

사면의 안정성을 평가하기 위한 기준을 안전율로 결정할 때 여러 기관에서의 안전율 기준을 참고로 허용안전율을 결정하였다. 건설교통부 구조물 설계기준에 따르면 절토사면의 최소안전율은 1.3으로 정하고 있으며 일본 건설성 표준안전율은 1.1~1.3으로 정하고 있다. 영국 국립석탄공사는 1.1~1.25를 최소안전율로 정하였다. Hoek and Bray는 도로사면이 아닌 경우 사면의

안전율을 1.0~1.3으로 정하였다(Lim et al., 2001). 이러한 자료를 토대로 허용안전율을 1.3으로 결정하고 사면안정성을 평가하였을 때 손상대 발생은 안정성에 영향을 미쳤다고 판단한다. 이렇게 안전율이 감소할 경우 soil nailing, rock bolt, earth anchor와 같은 보강이 필요할 것이다.

4. 안전율 영향 인자 도출

안전율에 영향을 미치는 인자들을 분석하기 위해 총 13가지 인자를 설정하였다. 물성감소비(reduction ratio)의 영향까지 확인하기 위해 B 타입을 선택하였다. Fig. 14에서 보듯이 사면의 높이, 경사, 두께(thickness), 지표면의 상·하부 폭, EDZ 크기와 같은 기하학적인 구조

Fig. 14. Total parameters affecting factor-of-safety

Table 7. Standard value of parameters and ratio of change with varying -50% to +50%

Total parameters	Standard value	Ratio of change (%)
① Height	100 m	79.9
② Angle	60°	93.8
③ EDZ size	5 m	15.1
④ Upper surface width	50 m	2.0
⑤ Reduction ratio	0.5	35
⑥ Cohesion	0.44 MPa	90.1
⑦ Internal friction angle	30°	78.5
Thickness	50 m	0
Poisson's ratio	0.3	0.1
Tensile strength	0.07 MPa	0.1
Elastic modulus	3.16 GPa	0.1
Lower surface width	50 m	0.1
In situ stress ratio	2	0

와 측압계수, 점착력, 내부마찰각, 포아송비, 탄성계수, 인장강도, 물성감소비가 인자로 선정되었다. 여기서 두께는 바닥면부터 지표면까지 거리를 의미한다(Fig. 14 참고). 먼저 각 인자들의 상대적인 영향도를 분석하기 위해 다른 인자들을 고정한 후 그 인자의 기준 물성에서 -50%에서 +50%까지 변화를 주어 모델링을 실시한 후, 물성 변화에 따른 안전율 변화를 파악하였다. 인자들의 기준 물성과 안전율 변화는 Table 7과 같다. 점착력과 사면의 높이, 경사는 큰 변화를 보였지만 사면의 두께와 포아송비, 인장강도, 탄성계수, 바닥 하부 폭의 경우 1% 이하의 미미한 안전율 변화를 보였다. 이러한 과정을 통해 안전율에 미치는 영향이 거의 없는 6가지 인자를 제외하였으며 남은 7가지 인자들로 실험계획법의 한 종류인 부분요인설계법을 이용한 인자들의 영향 분석을 실시하였다.

5. 안전율 영향 인자 분석

5.1 부분요인설계법(Fractional Factorial Design)

결과에 영향을 미치는 여러 인자들을 설정하고 인자들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 분석함으로써 최적의 조건을 찾아내는 방법을 실험계획법(Design Of Experiments, DOE)이라고 한다(Kim, 2007). 실험계획법은 효율적인 실험 방법을 설계하고 결과를 분석하는 통계학의 응용 분야이다. 1920년대 Fisher가 농업 실험을 위해 연구하여 발전시킨 이후 의학, 공학, 사회학 등 자연과학과 사회과학에 관계없이 광범위하게 적용되고 있다. 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 인자

들을 선정하고 인자들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 가장 효율적인 최적 조건을 찾아내고자 하는 것이 실험계획법의 목적이다.

일반적으로 실험에서 고려하는 인자들의 개수가 늘어남에 따라 실험횟수는 기하급수적으로 많아진다. 예를 들어, 인자의 개수가 10개라면 실험은 $2^{10}=1024$ 번의 실험을 해야 한다. 현실적으로 서로 다른 조건하에서 1024번의 실험을 실시하는 것이 무리가 있지만 경험적으로 ‘파레토의 법칙(Pareto's law)’ 따르고 있다고 알려져 있다. ‘최소인자의 원칙(Principal of factor sparsity)’이라고 불리는 이 법칙은 전체 결과의 80%는 전체 원인의 20%에서 일어난다고 설명한다. 즉, 결과에 영향을 미치는 유의한 인자는 10개중에서 많아야 3, 4개이고 2인자 교호작용까지 포함한다면 5, 6개를 넘지 않는다는 것이다. 굳이 1024번의 실험을 한다는 것은 경제적, 시간적으로 낭비될 수 있다. 오히려 이러한 실험조건의 차이를 무시하고 실험하다면 오차분산이 크게 나타날 수 있으며 추정량의 신뢰성이 무너질 수 있다. 이렇게 실험 인자가 많을 경우 전체 실험 중에서 일부만을 실시하여 관심 있는 효과들 중에서 유의한 효과들을 선별해 낼 수 있도록 일부분의 실험만으로 인자들의 영향을 실시하는 방법을 부분요인설계법이라고 한다(Park, 2010). 부분요인설계법은 고차의 교호작용은 거의 존재하지 않는다는 가정이 따르고 통상적으로 이 가정은 만족한다고 알려져 있다(Kim, 2007).

실험횟수를 줄이게 되면 요인들과의 효과가 분리되지 않은 교락(confounding)이 반드시 발생한다. 이러한 교락에 사용되는 교차효과를 Generator라고 하고 Table 8

Table 8. Selected 2^{7-p} fractional factorial designs (Montgomery, 1991)

Number of Factors k	Fraction	Number of Runs	Design Generators
7	2^{7-1}	64	G=ABCDEF
	2^{7-2}	32	F=ABCD
			G=ABDE
	2^{7-3}	16	E=ABC
			F=BCD
			G=ACD
	2^{7-4}	8	D=AB
			E=AC
			F=BC
			G=ABC

Table 9. Orthogonal array table for the 2^{7-3} factorial design

Run	A	B	C	D	E=ABC	F=BCD	G=ACD	F.S
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2.00
2	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	3.08
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	3.10
4	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	3.15
5	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	3.67
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	3.62
7	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	7.79
8	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	8.31
9	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	1.06
10	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	1.37
11	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	2.00
12	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	2.67
13	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	4.67
14	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	4.62
15	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	3.47
16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3.67

에 보듯이 E=ABC, F=BCD 또는 $x_5=x_1x_2x_3$, $x_6=x_2x_3x_4$ 와 같이 표현한다. 본 논문에서 선택된 7개의 인자들은 점착력(A), 경사(B), 사면 높이(C), 내부마찰각(D), 물성 감소비(E), EDZ 크기(F), 상부지표면의 폭(G)이다. 즉, 요인(factor)의 개수는 $k=7$ 이고 $2^7=128$ 번의 실험횟수를 $2^{7-3}=16$ 번으로 줄였다. 강도감소법에 의해 계산된 안전율은 실험계획을 통한 결과로 반응치(response)라고 한다.

5.2 인자 분석 결과

모델링을 통해 사면의 안전율을 계산한 후 부분요인 설계법을 이용한 각 인자들의 주효과(main effect)를 도출하였다. 주효과란 한 인자의 수준이 변할 때 반응치에 주는 영향의 크기를 정량적으로 표현한 것이다. 즉, 주효과의 절댓값이 크다는 의미는 해당 인자가 결과에

미치는 영향이 큰 인자일 가능성이 높기 때문에 설계 시 중요한 인자로 취급해야 함을 의미한다. Table 8을 참고하여 Table 9와 같은 직교배열표(orthogonal array table)를 작성하여 주효과를 계산하였다. 주효과의 계산은(+)수준의 평균에서(-)수준의 평균의 차이로 계산된다. 예를 들어 A(점착력)의 주효과는 Table 9를 참고하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{(2.00 + 3.08 + \dots + 8.31) - (1.06 + 1.37 + \dots + 3.67)}{8} = 1.5 \quad (1)$$

인자의 낮은 수준은 (-)로 높은 수준은 (+)로 나타내어 Table 10에 표시하였다.

식 (1)과 같이 A~G의 주효과를 계산하면 Fig. 15와 같다. 주효과의 절댓값이 상대적으로 큰 경사, 점착력,

Table 10. Lower and upper boundaries of the selected factors for the 2^{7-3} factorial design

Factors	Factor levels	
	Low setting (-1)	High setting (+1)
A (Cohesion)	0.7	1.3
B (Angle)	42	78
C (Height)	70	130
D (Internal friction angle)	35	65
E (Reduction ratio)	0.35	0.65
F (EDZ size)	3.5	6.5
G (Upper surface width)	35	65

Fig. 15. Main effect of the parameters on factor-of-safety

내부마찰각, 사면높이는 안전율에 많은 영향을 미치지만 물성감소비, EDZ 크기와 상부지표면 폭의 영향은 미미하였다. 주효과의 부호는 영향을 미치는 방향이 (+)

인지 (-)인지를 나타낸다. 예를 들어 점착력은 +1.5의 주효과가 나타났기 때문에 점착력이 증가할수록 안전율은 커지는 방향으로 영향을 미친다. 경사의 경우 -2.7이기 때문에 경사가 커질수록 안전율은 작아지는 방향으로 영향을 미친다는 의미이고 그 크기는 점착력보다는 크다.

두개 이상의 인자가 조합하였을 때 발생하는 효과의 크기를 교호작용(interaction effect)이라고 한다. 예를 들어, A와 B가 동시에 변하는 경우 교호작용 A×B가 존재한다고 하며 A, B, C 인자들 간의 조합으로 발생하는 영향을 교호작용 A×B×C가 존재한다고 한다. 앞에서 언급했듯이 3인자 이상의 고차 교호작용은 결과에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않았다. A×B, A×B, ..., F×G 총 21개의 2인자 교호작용을 Table 11에 나타내었고 그 중 B (사면경사)×D(물성감소비)의 교호작용이 -2.36로 가장 큰 값을 나타내는 것으로 보아 사면경사와 물성감소비와의 조합으로 발생하는 영향이 안전율에 가장 큰 영향을 미친것으로 판단된다. 물성감소비 단독으로는 사면의 안전율에 많은 영향을 미치지 않았지만 사면경사와의 조합에서 발생하는 교호작용이 크게 나타났으므로 설계 시 물성감소비도 고려해야할 인자임을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문은 2차원 연속체 코드인 FLAC을 이용하여 암반사면의 안정성을 손상대 유·무에 따라 비교·분석하였다. 손상대를 고려하지 않는 사면을 A 타입, 손상대가 존재하고 물성을 절반으로 감소시킨 사면을 B 타입, 손상대가 존재하고 불균등한 물성을 갖는 사면을 C 타입으로 정의하여 각 타입별로 역학적 거동과 안정성에 대해 비교하였다. 또한, 안정성의 지표가 되는 안전

Table 11. Two-factor interaction effect of the parameters on factor-of-safety

	A (Cohesion)	B (Angle)	C (Height)	D (Reduction ratio)	E (Internal friction angle)	F (EDZ size)	G (Upper surface width)
A		-0.15	-0.63	0.01	0.34	-0.20	-0.17
B	-0.15		0.34	-2.36	-0.63	-0.17	-0.20
C	-0.63	0.34		-0.17	-0.15	-0.80	0.01
D	0.01	-2.36	-0.17		-0.20	0.34	-0.63
E	0.34	-0.63	-0.15	-0.20		0.01	-0.80
F	-0.20	-0.17	-0.80	0.34	0.01		-0.15
G	-0.17	-0.20	0.01	-0.63	-0.80	-0.15	

울에 영향을 미치는 여러 인자들을 설정하고 부분요인 설계법을 이용한 인자 분석을 실시하여 다음과 같은 결과들을 도출할 수 있었다.

1. 모델 암반사면의 최대주응력은 A 타입에 비해 B, C 타입 순으로 감소하였고 감소율은 각각 38.3%, 86.0%였다. 변위는 A 타입에 비해 B, C 타입에서 증가하였고 증가율은 각각 30.7%, 239.6%였다. 강도강소법에 의해 계산된 안전율은 6.8%, 49.4%가 감소하였다. 암반사면 허용안전율을 1.3으로 보았을 때 계산된 C 타입의 안전율은 허용안전율을 이하로 감소하였기 때문에 설계 시 손상대를 고려할 필요가 있다.
2. 부분요인설계법을 이용하여 안전율에 영향을 미치는 인자를 분석한 결과 사면 안전율에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 사면경사와 점착력, 사면높이, 내부마찰각이었다. 반면 손상대 크기, 물성감소비, 상부사면의 폭은 영향이 있었지만 미치는 영향은 미미하였다.
3. 두 가지 인자간의 조합으로 발생하는 영향으로는 사면경사와 물성감소비와의 영향이 가장 큰 것으로 조사되었다. 물성감소비 단독으로 미치는 영향은 적었지만 사면높이와의 조합으로 발생하는 효과는 크게 나타났기 때문에 물성감소비 역시 설계 시 고려해야 할 인자로 판단된다.
4. 결론적으로 손상대는 사면의 역학적 거동과 안정성에서 많은 영향을 미쳤다. 설계 시 굴착 또는 발파 후 발생하는 손상대로 인해 본 논문에서 사용된 모델 사면과 같이 안전율을 허용치 이하로 감소시킬 수 있기 때문에 손상대를 고려한 설계와 시공이 필요하다.

본 논문은 불연속면이나 지하수와 같은 영향은 배제하고 오직 손상대 유·무에 따른 안전율 변화만을 비교하였기 때문에 향후 연구에서는 암반 사면 안정성의 보다 정확한 평가를 위해서는 손상대 뿐 아니라 불연속면의 기하학적인 구조와 물성, 발생빈도 및 지하수의 영향을 고려한 해석이 필요할 것이다.

사 사

본 논문은 2013년도 인하대학교(INHA_46430_01)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Bäckblom, G., C.D. Martin, 1999, Recent experiments in hard rocks to study the excavation response: Implication for the performance of a nuclear waste geological repository, *Tunnelling and underground space technology*, Vol. 14, 377-394.
2. Bauer, C., F. Hommand, 1996, Disturbed zones assessment with permeability measurements in the ZEDEX tunnel, *Proceedings of the excavation disturbed zone workshop, Designing the excavation disturbed zone for a nuclear waste repository in hard rock*, Manitoba, Canada.
3. Bossart, P., P.M. Meier, A. Moeri, T. Trick, J. Mayor, 2002, Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the opalinus clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology*, 66, 19-38.
4. Cai, M., P.K. Kaiser, 2005, Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model, *Tunnelling and underground space technology*, 301-310.
5. Choi, B.H., D.W. Ryu, C. Sunwoo, 2006, A study on the improvement of surface blasting method in Pasir Coal Mine, *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 24, No. 1, 57-62.
6. Collins, D.S., R.P. Young, 2003, Interpreting the amount and orientation of microcracks in the excavation damaged zone using velocity, modulus and crack density values, *The 2002 international EDZ workshop*, Ontario, Canada, Atomic Energy of Canada Limited.
7. Deng, J.H., C.F. Lee, X.R. Ge, 2001, Characterization of the disturbed zone in a large rock excavation for the Three Gorges Project, *Can. Geotech. J.* 38: 95-106.
8. Emsley, S., O. Olsson, L. Stenberg, H.J. Alheid, S. Falls, 1997, A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring, ZEDEX, SKB(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.) Technical report 97-30, 198p.
9. Ericsson, L.O., P. Brinkhoff, G. Gustafson, S. Kvartsberg, 2009, Hydraulic features of the excavation disturbed zone-laboratory investigations of samples taken from the Q-and S-tunnel at Äspö HRL, SKB Report R-09-45.
10. Fisher, R.A., 1935, *The design of experiments*, Oxford, England: Oliver & Boyd., 251p.
11. Goodman, R.E., D.S. Kieffer, 2000, Behavior of rock slope, *Journal Geotech Geoenviron Eng.*, ASCE 2000; 126(8), 675-684.
12. Itasca Consulting Group Inc., 2002, *FLAC, FISH in FLAC*, Minneapolis, Minnesota, USA.
13. Itasca Consulting Group Inc., 2011, *FLAC Version 7.0, Factor of Safety*, Minneapolis, Minnesota, USA.
14. Kang, S.S., Atsuo Hirata, Yuzo Obara, Naoyuki Haraguchi, 2006, Evaluation of rock damage zone using seismic logging method, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 16, No. 1, 50-57.
15. Kim, H.C., 2007, *Introduction to design of experiment*, Hanol Publisher, 1-2, 192-196, 168p.
16. Kim, J.S., S. Kwon, 2014, Sensitivity analysis of tunnel stability with a consideration of an excavation damaged zone, *Journal of Korean Tunnelling Underground Space*

- Association, Vol. 16, No. 1, 91-103.
17. Kim, J.S., S. Kwon, W.J. Cho, 2009, An assessment of the excavation damaged zone in the KAERI Underground Research Tunnel, *Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 27, No. 1, 21-31.
 18. Kwon, S., 2003, Thermo-mechanical sensitivity analysis of repository design parameters using Korean geological conditions, KAERI/TR-2360/2003
 19. Kwon, S., W.J. Cho, 2008, Investigation of the development of the effect of an excavation damaged zone at KAERI Underground Research Tunnel, KAERI/TR-3533/2008.
 20. Lai, X., M. Cai, F. Ren, M. Xie, T. Esaki, 2006, Assessment of rock mass characteristics and the excavation disturbed zone in the Lingxin Coal Mine beneath the Xitian River, China, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 572-581.
 21. Lee, C.S., 2012, Characterization of thermal-mechanical behavior of rock mass in the excavation damaged zone at KURT, Ph.D. Thesis of Seoul national university, 78-79.
 22. Lee, C.S., S. Kwon, J.W. Choi, S. Jeon, 2011, An estimation of the excavation damaged zone at the KAERI Underground Research Tunnel, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 21, No. 5, 359-369.
 23. Lim, H.U., C.H. Kim, H.J. Baek, 2001, Stability analysis of rock slope in limestone mine by numerical analysis, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 11, No. 3, 270-278.
 24. Lu, W.B., Y.G. Hu, J.H. Yang, M. Chen, P. Yan, 2013, Spatial distribution of excavation induced damage zone of high rock slope, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 64, 181-191.
 25. Malmgren, L., D. Saiang, 2005, Excavation damaged zone at Kiirunavaara Mine, *Journal of Applied Geophysics*.
 26. Malmgren, L., D. Saiang, J. Töyrä, A. Bodare, 2007, The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara Mine, Sweden-by seismic measurements, *Journal of Applied Geophysics* 61, 1-15.
 27. Martino, J.B., N.A. Chandler, 2004, Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41, 1413-1426.
 28. Montgomery, D.C., 1991, *Design and analysis of experiments*-3rd edition, 335-378.
 29. Park, S.H., 2010, Enforcement method of design of experiment, 2p.
 30. Park, S.H., J.W. Kim, 2011, *Modern design of experiment using MINITAB*, Minyoung Publisher, 15p, 324p.
 31. Saiang, D., 2011, Blast-induced damaged zone studies, Final report to Trafikverket, Luleå university of technology, Sweden.
 32. Saiang, D., E. Nordlund, 2008, Numerical study of the mechanical behavior of the damaged rock mass around an underground excavation, Appendix D: 2008 Massmin power point presentation, Luleå university of technology, Sweden.
 33. Sato, T., T. Kikuchi, K. Sugihara, 2000, In situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogen sedimentary rock at Tono Mine, Central Japan, *Engineering Geology* 56(1-2), 97-108.
 34. Sheng, Q., Z.Q. Yue, C.F. Lee, L.G. Tham, H. Zhou, 2002, Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project, China, *Int. Journal Rock Mech. Min. Sci.*, 39(2002), 165-184.
 35. Yang, H.S., T.W. Ha, W.B. Kim, M.J. Choi, J.H. Lee, 2005, Development of a rock slope analysis software considering ground water level, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 15, No. 3, 213-222.
 36. Zhou, J., X. Yang, H. Xing, Y. Xue, G. He, 2014, Assessment of the excavation-damaged zone in a tall rock slope using acoustic testing method, *Geotech. Geol. Eng.*, Technical note, Springer International Publishing Switzerland.

김진수

2011년 인하대학교 공과대학 토목공학과 공학사

E-mail: kimjs@inha.edu
현재 인하대학교 대학원 에너지자원공학과 공학석사

천대성

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3248
E-mail: cds@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경본부 지하공간연구실 책임연구원

권상기

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1996년 University of Missouri-Rolla, Mining Engineering 공학박사

Tel: 032-860-7554
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr
현재 인하대학교 공과대학 에너지자원공학과 교수

박의섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경본부 지하공간연구실 책임연구원