터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제19권 제4호, 2009년 8월, pp. 366~372

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 19, No. 4, 2009, pp. 366-372
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

SB발파에서 파단면 제어의 고도화에 관한 연구

조상호[1)]*, 정윤영[2)], 김광염[3)], 가네꼬 카츠히꼬[4)]

Study on the Precise Controlling of Fracture Plane in Smooth Blasting Method

Sang-Ho Cho, Yun-Young Jeong, Kwang-Yum Kim and Katsuhiko Kaneko

Abstract Recently, in order to achieve smooth fracture plane and minimize the excavation damage zone in rock blasting, controlled blasting methods which utilize new technologies such as electronic delay detonator (EDD) and a notched charge hole have been suggested. In this study, smooth blastings utilizing three wing type notched charge holes are simulated to investigate the influence of explosive initial density on the resultant fracture plane and damage zone using dynamic fracture process analysis (DFPA) code. Finally, based on the dynamic fracture process analyses, novel smooth blasting method, ED-Notch SB (Electronic Detonator Notched Charge Hole Smooth Blasting) is suggested.

Key words fracture plane, excavation damage zone, rock blasting, smooth blasting, dynamic fracture process analysis (DFPA) code, notched charge holes, electronic detonator

초 록 최근, 암반발파에서 평활한 파단면과 굴착손상영역을 제어하기 위한 목적으로 전자지발뇌관 및 노치장약공 등을 이용한 제어발파기술들이 개발되어 오고 있다. 본 연구에서는 날개형 노치 장약공을 이용한 SB발파에서 암반 내 파괴과정을 모사하여 파단면과 암반손상제어에 미치는 영향인자에 대하여 고찰하였다. 최종적으로 장약공 노치의 파단면 제어효과에 관한 수치해석적 고찰을 날개형 노치장약공과 전자뇌관을 이용한 새로운 SB발파법으로, ED-Notch SB발파법(Elerectronic Detonator Notched Charge Hole Smooth Blasting Method)을 제안하였다.

핵심어 파단면, 굴착손상영역, 암반발파, SB발파, 동적파괴과정해석코드, 노치 장약공, 전자뇌관

1. 서 론

SB발파는 암반터널이나 지하공동 굴착에서 널리 사용되고 있는 발파공법으로 여굴 및 미굴을 최소화하여 평활한 파단면을 형성하고, 주위암반의 손상을 최소화하기 위한 제어발파공법이다. 그러나 DS뇌관기폭에 의한 기존SB발파에서는 최외곽공의 동시기폭은 극히 어려워 설계굴착면을 따라 평활한 파단면이 형성되어도 주변암반의 손상제어가 어렵게 되어 전자지연식 뇌관[1-3)]등의 정밀 기폭시스템이 개발되어 현장에 적용되고 있다. SB발파에 전자지연식 뇌관의 적용은 여굴을 감소시키고 암반손상을 제어할 수 있게 되었으며 이 결과 굴착경비의 경감등으로 보다 더 경제적인 암반굴착이 이루어지고 있다[1)].

위에서 설명한 바와 같이 제어발파기술은 지금까지 향상되어오고 있지만, 정밀도가 더욱 향상된 제어발파기술이 요구되고 있는 실정이다. 예를 들면, 고준위 방사성폐기물의 지층처분계획[4)]에서는 처분갱도 매립 후에 핵종의 주이동 경로가 되는 갱도 주변암반의 손상영역이 주목되고 완화영역의 제어가 방사성물질의 격리성능의 지배인자로서 고려되고 있다. 그러므로 처분갱도를 발파굴착하는 경우에는 발파에 의한 암반손상을 완전히 제어할 필요가 있으며, 이것이 불가능 할 경우에는 경비를 증가시켜서라도 TBM등의 기계굴착공법을 고려해야만 하는 실정이다. 이러한 암반의 격리성에 대한 요구와 함께, 압축공기내지 액화가스의 암반저장 등에서는 암반공동의 밀폐성이 요구되고 있다. 이러한 경우도 상기와 동일한 문제를 포함하고 있다. 그러나 이러한 문제들과 관련하여 암반손상을 완벽히 제어하

1) 전북대학교 자원·에너지공학과 조교수
2) ㈜ 청석엔지니어링 터널사업부 차장
3) 한국건설기술연구원 책임연구원
4) 일본 북해도대학 대학원공학연구과 교수
* 교신저자 : chosh@chonbuk.ac.kr
접수일 : 2009년 8월 19일
심사 완료일 : 2009년 8월 27일
게재 확정일 : 2009년 8월 27일

는 발파공법이 가능한가라는 문제도 제기되는데, 이러한 제어발파공법은 파쇄라는 것 보다는 절단의 기능을 중시한 발파공법이라고 볼 수 있다.

SB발파에서 파단면의 발생 메커니즘은 서로 근접한 발파공으로부터 전파된 응력파의 상호간섭에 기인하는데, 이러한 응력파의 상호간섭이 일어나기 전까지 각각 독립된 발파공으로부터 발생되는 균열은 각각 장약공으로부터 동심원상으로 전파하게 된다. 다시말하면 응력파의 간섭이 파단면을 형성하기 이전에 발파공으로부터 발생된 방사성 균열들은 설계파단면 이외의 방향으로 전파하게 되므로 주변암반손상의 발생은 본질적으로 피할 수 없게 된다. 이러한 손상의 억제책으로서 공간격을 가능한 한 짧게 하는 것을 고려할 수 있으나 이것은 발파의 경제적 측면에서 불리하게 된다. 따라서 상기의 문제에 대처하기 위해서는 기폭직후 균열전파 방향의 제어가 가능하도록 장약공의 형태 및 장약조건을 변경할 필요가 있는데, 특히 설계 굴착면의 방향과 장약공 벽면에 새겨진 날개모양의 노치의 방향을 일치시켜 균열방향을 제어하는 발파공법이 주목을 받고 있다. 일찍이 한번의 천공으로 날개형 노치를 완성할 수 있는 Wing-Hole 드릴비트[4]가 개발되어 터널 및 노천발파를 대상으로 현장 적용실험이 진행된 바 있다. 그러나 원리상 연결로드에 가해지는 노치비트의 반복적인 충격에 의하여 연결로드의 용접부위에 손상이 발생하는 문제가 있어 상용화에 이르지 못하였으나, 최근 국내에서 이러한 단점을 보완한 노치비트시스템[6]을 개발하여 터널현장에 성공적으로 적용하였다.

본 연구에서는 날개형 노치 장약공을 이용한 SB발파에서 암반 내 파괴과정을 모사하여 장약공 노치의 파단면 제어효과를 검토한다. 노치 장약공에 적용하는 폭약밀도에 따른 파단면 형성 및 암반손상에 관하여 고찰하고, 파단면의 정밀제어가 가능한 SB발파법을 제안한다.

2. 동적파괴과정해석법 및 해석모델

2.1 동적파괴과정 해석법

본 연구에서는 충격하중에 의한 복수의 균열발생 및 전파과정의 모사가 가능한 동적파괴과정해석(Dynamic Fracture Process Analysis)[3]를 적용하여 날개형 노치장약공을 이용한 SB발파를 모델링하였다. 균열의 발생, 성장, 결합 등은 요소경계변의 파괴로서 취급하였으며, 요소경계변의 응력은 그 응력경계변을 포함하는 요소들의 응력의 평균값을 계산하고 이 평균값과 요소경계변의 인장강도의 비(국소위험율)를 계산하여 인장파괴판정에 적용하였다. 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다. 강도 불균일성의 영향에 비해서 탄성률의 불균질성의 영향이 적으므로 강도만을 불균일성으로 가정하는 것으로 한다. 균열선단 프로세스 영역을 유한한 강도를 가진 균열면으로 가정하여 취급하면 프로세스영역의 역학특성은 균열면의 개구변위와 결합력과의 관계, 즉 인장연화곡선으로써 표현이 가능하다. 본 해석은 원리상 요소분할이 해석결과에 영향을 미치므로, 그 영향을 배제하기 위해 가능한 한 요소를 적게 세분화할 필요가 있으며 충분히 작은 시간증분을 고려한다.

2.2 해석모델 및 해석조건

본 해석에서는 SB발파의 최외곽공 발파를 산정하여 Fig. 1에 보여주는 바와 같이 반무한암반 중에 자유면에 평행한 날개형 노치를 가진 3개의 장약공을 배치시키고, 해석대상영역은 연속경계조건과 자유면을 경계로 이루어진 일자유면발파를 가정한다. 여기서 장약공의 간격과 최소저항선은 각각 0.6 m, 0.6 m로 한다. 해석모델은 건전한 화강암으로 가정하였으며, Table 1에 역학적 물성치 및 해석조건을 나타내었다. 유한요소의 모델의 분할은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 절점은 28,734개, 요소는 56,664개로 하였다. 장약공내경은 일반적인 SB발파의 규격인 직경 45 mm로 하였으며 장약공 공벽에 작용하는 폭발생성가스는 등엔돌피 팽창을 가정한

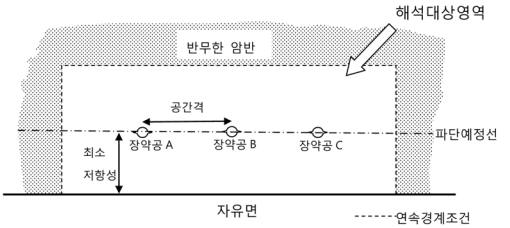
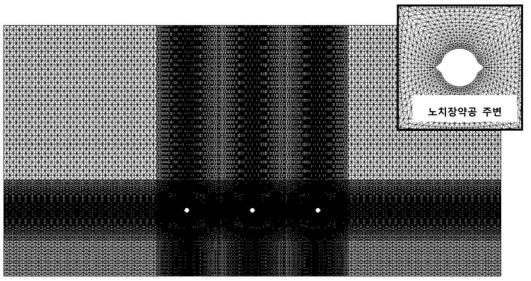


Fig. 1. Geometry for a wing type notched hole smooth blasting

Table 1. Mechanical properties and calculation conditions for the analysis model

Parameter	Value
Density ρ (kg/m^3)	2700
Elastic modulus E (GPa)	80
Poisson's ratioν	0.25
Average compressive strength Sc (MPa)	250
Average tensile strength St (MPa)	18
Fracture energy Gf (Pa·m)	300
Coefficient of uniformity m	5
P wave velocity CP (m/s)	6000



Total number of nodal points : 28,734
Total number of elements : 56,664

Fig. 2. The finite element layout for the analysis models

Table 2. JWL parameters for initial explosive densities

Parameter	ρ_0=0.7	ρ_0=1.0
A (GPa)	254.815	96.453
B (GPa)	5.578	2.069
C (GPa)	0.914	0.593
R1	5.66075	5.68434
R2	1.48967	1.37838
ω	0.31713	0.25373
Peak Pressure (MPa)	63	149

JWL상태방정식[3]을 적용하였다.

$$P = Aexp(-R_1V)+Bexp(-R_2V)+CV-(\omega+1) \quad (1)$$

여기서 *A*(GPa), *B*(GPa), *C*(GPa), *R1*, *R2*, *ω*는 실험 및 경험적으로 구하는 변수이고 *V*는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이 체적의 비에 따라 디카플링 및 장약공의 체적변화에 따른 압력변화를 표현하도록 하였다. 폭약은 SB용 슬러리폭약 (약경 22 mm)을 가정하여 폭약밀도에 따른 JWL변수를 계산하여 Table 2에 정리하였다.[1-3] 폭약밀도의 증대에 따른 파단면 제어효과를 살펴보기 위하여 초기폭약밀도를 0.7, 1 g/cc으로 고려하였다. 여기서 0.7 g/cc은 저비중폭약을, 1 g/cc는 일반폭약을 산정한 것으로 3장에서 해석결과를 설명한다.

3. 날개형 노치장약공을 이용한 SB 발파의 암반파괴과정해석

3.1 저비중 폭약에 의한 암반파괴과정

Fig. 3(a)은 SB발파에서 최외곽공을 날개형 노치장약공으로 천공을 하고 폭약밀도가 0.7 g/cc인 저비중폭약을 적용하는 것을 가정하고 Table 2에서 제시한 JWL변

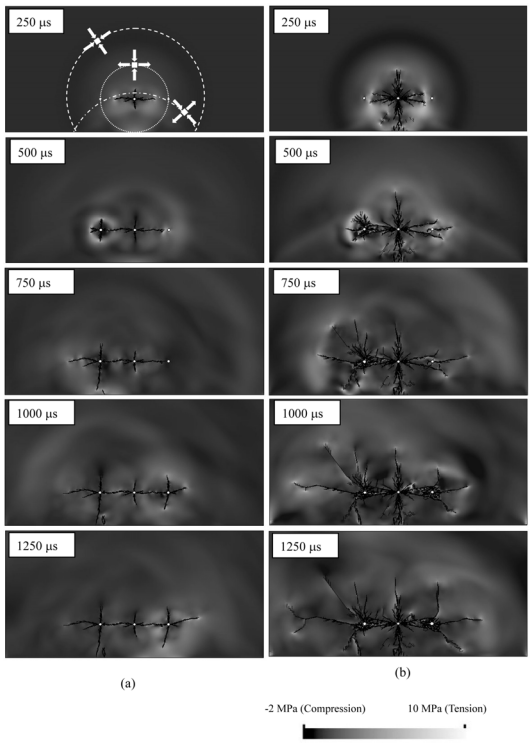


Fig. 3. Distribution of the maximum principle stress and crack propagation in wing type notched charge hole blasting when (a) ρ_e=0.7 and (b) ρ_e=1.0.

수를 입력하여 파괴과정해석한 결과를 보여주고 있다. 각 장약공에 작용하는 공내최대압력은 63 MPa이며 DS 지발뇌관의 기폭으로 가정하였다. DS 지발 뇌관의 기폭초시 오차[1]는 수백 *ms* 이상으로 계산효율성을 고려하여 먼저 기폭된 장약공 B에 의한 응력상태가 안정되는 시각 400 μs 후에 다음 장약공 A, 장약공 C가 차례로 기폭되는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 발파균열은 진한 흑색실선으로 표시하고 있으며, 최대주응력 중 압축응력의 크기분포는 흑색의 농도로서 나타내고 인장응력은 백색의 농도로서 나타내고 있다. 그림 내 시간은 장약공 B 공벽에 발파하중이 작용하기 시작하는 시간으로부터의 경과시간을 의미한다.

기폭후 250 μs의 해석결과를 살펴보면 장약공B를 중심으로 반경방향 압축응력파(파선)가 전파하며 자유면에서 반사된 인장응력파(파선-점선)는 중심장약공 부근에 도달하고 있다. 반경방향 압축응력파의 뒤를 따라 접선방향 인장응력파(점선)이 전파하고 있다. 균열성장패턴을 살펴보면, 자유면과 평행한 방향과 수직인 두 방향으로 균열이 성장하고 있으며, 특히 자유면에 평행한 균열의 성장이 두드러지게 보이고 있다. 이러한 탁

월균열의 성장은 노치효과와 함께 자유면으로부터 반사된 인장응력파에 의하여 발생되었다.

경과시간 500 μs에서 장약공 A의 기폭에 의하여 발생한 균열은 장약공 B로부터 발생된 균열과 연결되고 있으며 자유면방향으로 수직균열이 성장하고있다. 경과시간 1000 μs에서는 장약공 C로부터 발생된 균열은 다른 장약공으로부터 발생된 균열과 연결되어 자유면과 평행하고 평활한 파단면을 형성시키고 있다.

정리하면, 노치 장약공에 저비중 폭약을 고려한 경우에 자유면과 평행한 방향으로 평활한 파단면이 형성되나 파단면의 배면에 자유면과 수직한 방향으로 손상균열이 발생하였다.

3.2 일반 폭약에 의한 암반파괴과정

Fig. 3(b)은 일반적인 폭약의 밀도를 고려하여 1 g/cc의 JWL변수를 입력하여 파괴과정해석한 결과를 보여주고 있다.

기폭후 250 μs의 해석결과를 살펴보면 장약공 B를 중심으로 자유면에 수직한 방향과 평행한 방향으로 다수의 균열이 전파하고 있다. 특히 자유면 방향으로 전파하는 균열은 자유면과 연결되고 이 수직균열 좌우에 크래터형상의 균열이 발생하고 있다. 경과시간 500 μs에서는 장약공 A로부터 발생된 균열은 장약공 B로부터 전파된 균열의 영향으로 자유면방향으로 균열발생이 저지되어 예정파단선 위쪽에 다수의 방사상 인장균열이 발생하였다. 기폭되지 않은 장약공 C로 균열의 성장이 보이는데, 이것은 장약공 B로부터 전파된 압축응력파가 장약공 C를 변형시키며 발생된 인장응력에 의하여 발생된 것으로 기폭후에도 탁월균열로 계속해서 성장하게된다.

해석결과를 정리하면, 노치 장약공에 일반폭약을 고려한 경우에는 파단예정선을 따라 파단면이 형성되었으나 파단예정선 배면부에 많은 인장균열이 발생하여 주변암반에 넓은 손상영역을 남기게 된다. 반면에 저밀도 폭약을 적용한 경우에는 평활한 파단면이 형성되었으며 비교적 적은 손상영역을 보여 장약공 노치의 파단면 제어 효과를 증명하고 있다. 위 결과로부터 장약공 노치를 이용한 SB발파는 파단면에 효과적이나 폭약밀도, 기폭초기 등 다양한 발파변수에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

4. 장약공 노치의 파단면 제어효과에 관한 고찰

4.1 가압속도의 영향

Fig. 3(a)와 (b)는 폭약밀도의 변화에 따른 최종 파괴패턴을 보여주는데, 이것은 장약공에 작용하는 압력의 최대값과 압력의 가압속도에 의하여 발생하는 것으로, 해석모델에 적용된 최대압력과 가압속도는 2배 이상의 차이를 보이고 있다(Table 3). 특히 장약공주변에서 발생하는 초기균열의 발생 및 전파는 최종 파괴패턴의 형성에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Fig. 4(a)와 (b)에 저비중폭약과 일반폭약에 의한 장약공주변의 균열발생과정을 기폭후 5 μs 시간간격으로 보여주고 있다. 살펴보면, 동일한 경과시간에서 저비중의 경우가 균열의 선단부근에서 응력집중범위가 좁고, 발생된 균열의 수가 적게 나타나고 있다. 기존 연구결과에 의하면 발파공내 가압속도가 빠른 경우에는 많은 균열이 발생하고 서로간에 응력집중을 방해하여 균열진전이 늦어

Table 3. Peak borehole pressures and applied pressure rate

Density	Peak Pressure (MPa)	Pressure Rate (MPa/μs)
ρ_0=1.0	149	149
ρ_0=0.7	63	63

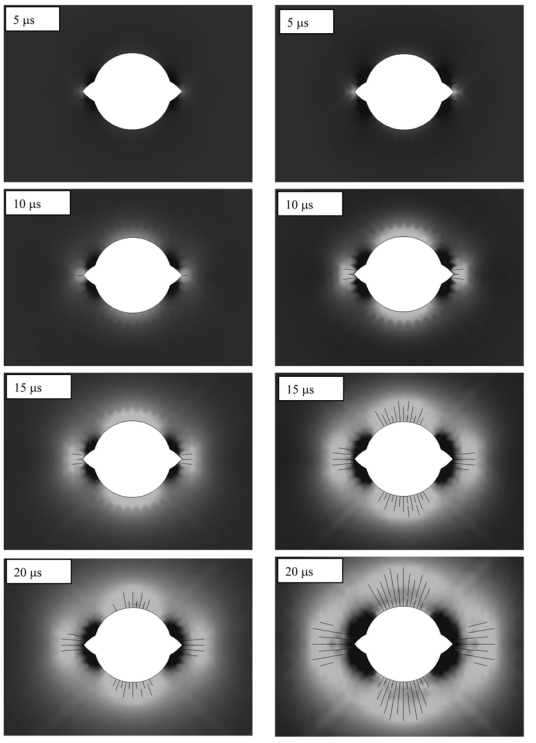


Fig. 4. Distribution of the maximum principle stress and crack propagation around the charge hole when (a) ρ_e=0.7 and (b) ρ_e=1.0.

지고 균열성장길이가 줄어들지만, 반면에 가압속도가 늦은 경우에는 적은균열이 발생하고 균열 서로간의 간섭이 줄어들어 탁월균열의 발생시기가 빨라지고 성장길이가 길어진다고 보고되고 있다.[7] 결과적으로 보다 더 가압속도가 느린 저비중 폭약의 경우가 적은 수의 탁월균열이 더욱 길게 성장하게 된것으로 판단된다.

4.2 균열 성장 길이에 미치는 영향

기존연구[3]에 의하면 원형장약공을 적용한 발파에서는 암반의 불균질성에 의하여 특정한 방향을 갖지 않는 복수 균열들이 방사상으로 전파하게 되지만, 노치 장약공 발파와 같은 균열제어기법을 적용한 경우에는 예정된 방향으로 소수의 탁월균열이 성장하게 된다. 파단면 제어에 있어 균열의 성장길이는 중요한 변수가 되므로, 해석결과로부터 균열의 최대길이를 Fig. 5와 같이 조사하였다. 폭약밀도에 따른 균열최대길이를 알아보기 위하여 0.8 g/cc, 0.9 g/cc에 대한 추가계산을 수행하였으며, 일반 장약공에 의한 암반손상깊이와 비교분석하기 위하여 원형장약공을 고려한 파괴과정해석결과를 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 살펴보면, 노치장약공과 원형장약공에서 균열최대길이는 폭약밀도의 증가에 따라 증가하였으며, 0.7 g/cc의 저밀도폭약에서는 노치장약공이 원형장약공보다 2배 이상의 균열최대길이를 보였으나 폭약밀도가 증가하면서 그 차이가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 노치 장약공을 적용하더라도 폭약밀도가 증가하면 노치효과가 감소한다는 사실을 증명하고 있다.

4.3 암반손상깊이에 미치는 영향

SB발파에 의해 평활한 파단면이 형성되었을 지라도 설계파단면의 배면부에도 균열이 발생하게 된다. 일반적으로 이러한 균열이 발생 된 영역을 발파손상영역권이라고 한다. 해석결과를 바탕으로 손상영역의 크기와 폭약밀도와의 관계를 분석하고 손상영역 제어방법에 대해서 논하기로 한다. 손상영역은 체적으로 취급되어야 하지만 여기에서는 정량화를 위해 간략히 Fig. 7과 같이 배면부에 발달한 균열들 중에서 설계파단면으로 부터 가장 길게 발달한 균열의 길이를 손상깊이로 정의하

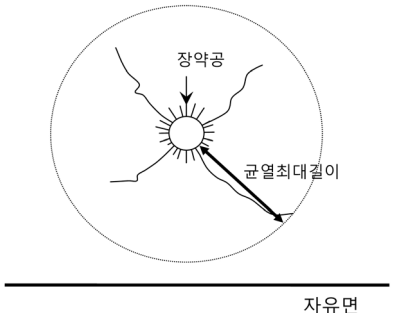


Fig. 5. Description of maximum crack length in the analysis results

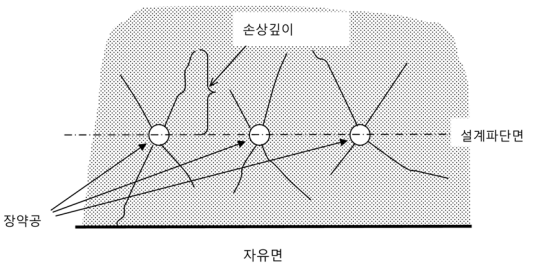


Fig. 7. Description of damage depth in the analysis results

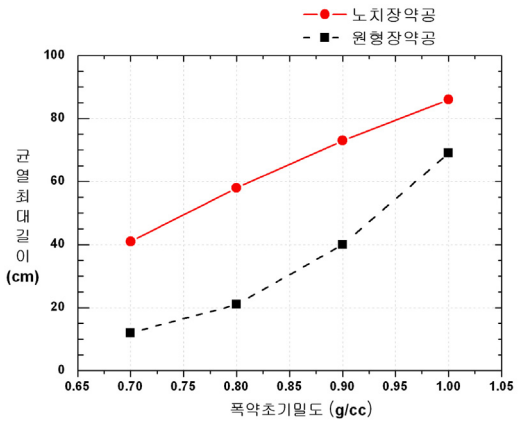


Fig. 6. Maximum crack lengths and initial explosive densities

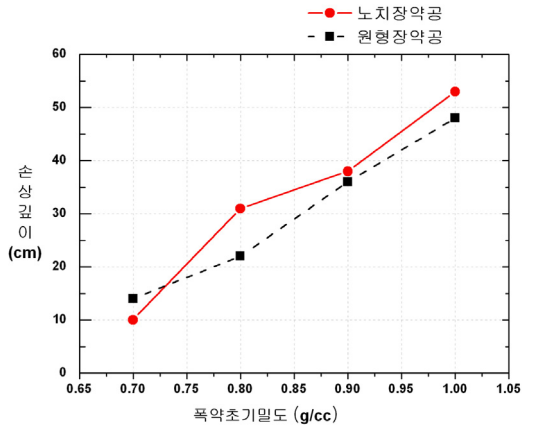


Fig. 8. Damage depths and initial explosive densities

기로 한다. 손상깊이를 비교하기 위하여 0.8 g/cc, 0.9 g/cc에 대한 추가계산을 수행하였으며, 일반 장약공에 의한 암반손상깊이와 비교분석하기 위하여 원형장약공을 고려한 파괴과정해석을 실시하여 Fig. 8에 노치장약공과 원형장약공을 적용한 경우의 폭약밀도와 손상깊이의 관계를 나타내고 있다. 살펴보면, 노치장약공과 원형장약공에서 모두 폭약밀도가 증가함에 손상깊이가 증대하고 있음을 보여주고 있으나, 장약공 형태의 변화에 따른 손상깊이의 변화는 적게 나타나고 있다. 이 결과로부터 SB발파 등 제어발파에서 노치 장약공의 적용만으로 굴착면 주변의 암반손상영역을 제어하는 것은 어렵다는 것을 알수 있다.

5. 굴착파단면의 정밀제어에 관한 고찰 및 제안

기존 연구결과에 의하면[1-3], 전자식 지발뇌관은 DS지발뇌관에 비하여 파단면의 평활도를 향상시키고 주변 암반의 손상영역이 현저하게 감소되는데, 이러한 결과는 전자뇌관의 정밀한 지발시차가 근접한 발파공으로부터 전파된 응력파의 상호간의 간섭효과를 증대시켜 발생한다고 지적하고 있다. 즉 노치 장약공에 전자식 지발뇌관을 사용하면, 장약공 노치에 의한 균열 발생 방향과 균열의 성장길이가 제어됨과 전자뇌관의 이용으로 주변손상영역의 현저히 저감시키고 보다 평활한 파단면을 형성시킬수 있을 것으로 판단된다. 본 장에서는 신개념의 정밀제어발파기법을 제안할 목적으로 노치 장약공에 전자식 지발뇌관을 적용하고 저밀도폭약을 사용한 SB발파를 산정하여 동적파괴과정해석을 수행한 결과를 Fig. 9에 나타내고 있다. 여기서 해석모델은 Fig. 3(a)을 사용하고 전자뇌관의 기폭초시오차를 고려하여 각공에 90 μs, 0 μs, 120 μs의 간격으로 발파하중이 작용하는 것으로 하였다. 살펴보면, DS뇌관을 적용한 Fig. 3의 결과와는 달리 기폭후 150 μs에서 각공의 중간부 상하부에 압축응력의 집중현상이 보이는데, 이것은 장약공 A, 장약공 C의 배면부에 발생된 균열의 성장을 억지시킴과 동시에 굴착예정선에 직교하는 방향으로 인장응력(그림내 화살표)이 발생하게된다. 결국 암반손상이 억제되고 평활한 파단면이 형성되는 결과를 얻을 수 있었다.

앞에서 보여준 해석결과들을 살펴보면, 노치장약공에 전자뇌관을 이용한 SB발파에서 가장 높은 파단면 및 암반손상영역 제어효과가 있음을 알수 있다. 본 논문에서는 굴착면의 정밀한 제어를 목적으로 날개형 노치장약공과 전자뇌관을 이용한 새로운 SB발파법으로, ED-Notch SB발파법을 제안한다. 본 장에서 제안하는 ED-Notch SB발파법은 차폐성능을 요구하는 핵폐기물 지층처분장 및 에너지저장시설의 건설, 초근접 터널의 굴진발파에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

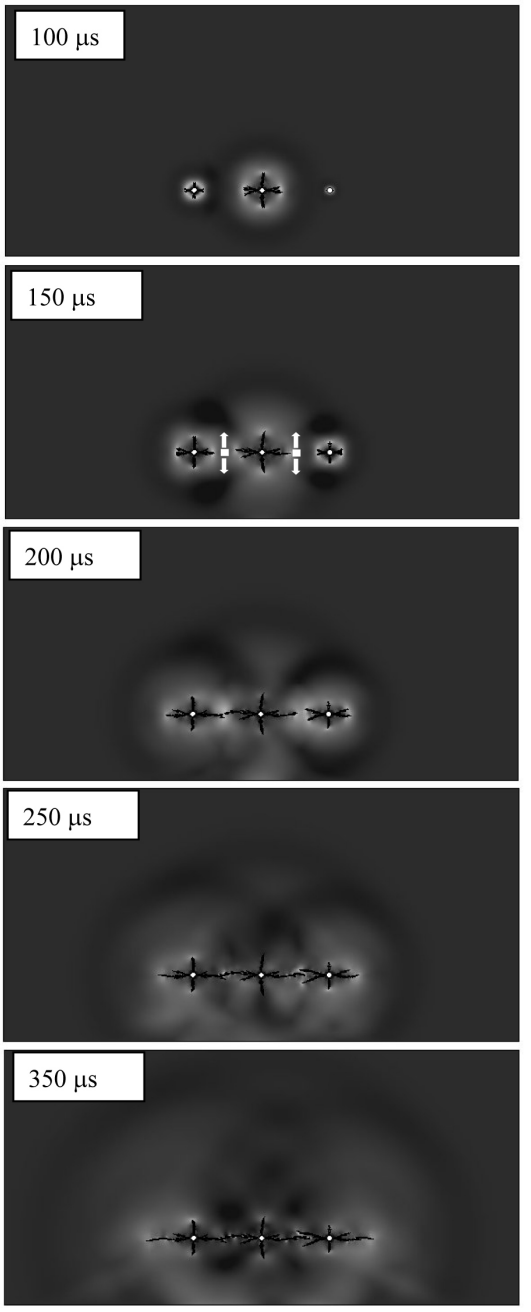


Fig. 9. Distribution of the maximum principle stress and crack propagation in wing type notched charge hole blasting considering an initiation error of the electronic delay

6. 결 론

본 연구에서는 날개형 노치 장약공을 이용한 SB발파에서 암반 내 파괴과정을 모사하여 파단면 제어에 미치는 영향인자에 관하여 고찰하였다. 본 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

노치 장약공에 저비중 폭약을 고려한 경우에는, 자유면과 평행한 방향으로 평활한 파단면이 형성되었으나 파단면의 배면에 자유면과 수직한 방향으로 손상균열이 발생하였다. 노치 장약공에 일반폭약을 고려한 경우에는 파단예정선을 따라 파단면이 형성되었으나 파단예정선 배면부에 많은 인장균열이 발생하여 주변암반에 깊은 손상영역을 남겼다. 장약공 노치의 파단면 제어효과에 관한 고찰과 수치해석적인 검증을 통하여 날개형 노치장약공과 전자뇌관을 이용한 새로운 SB발파법으로, ED-Notch SB발파법을 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단(현 한국연구재단)의 지원을 받아 연구되었음(과제번호: D00574).

참고문헌

1. Tanaka ,T., H. Hirata, M. Yamamoto and Y. Matsunaga, 1995, A experimental study on the damage area of smooth blasting by the electronic delay detonator,. J. Jpn Explosive Society, 56.1, 26-32.
2. Yamamoto M., Y. Matsunaga, H. Hirata and K. Kaneko, 1997, Development of smooth blasting design support system based on computer simulation (I). J. Jpn Explosive Society, 58.3, 100-109.
3. 조상호, 양형식, 金子勝比古, 2004, SB발파에서 지발뇌관의 기폭초기오차가 암반파괴과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회), 14. 2, 121-132.
4. Furuichi M., Okutsu K, Tanaka T. and Tanai K., 1998, A study of the sealing concept of high level radioactive waste repository, Journal of Environmental Systems and Engineering, In Journals of the Japan Society of Civil Engineers, No. 594, VII-7, 21-33.
5. 椋木淳二, 大原直, 秋吉直義,国武誠二, 1992, 新發破工法의 開發, 윙그홀 비트, 윙그홀 블라스팅공법, 터널과 지하, 일본터널기술협회지, 23.7, 41-45.
6. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규, 2008, 발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 개발에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17.3, 216-224.
7. Cho S.H. and K. Kaneko, 2004, Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.,. 41.5, 771-784.

조 상 호

1998년 전북대학교 자원공학과 학사
2000년 전남대학교 자원공학과 석사
2003년 북해도대학 대학원 공학연구과 박사

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@chonbuk.ac.kr
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

김 광 염

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 031-9100-225
E-mail: kimky@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원, 지하구조물연구실 연구원

정 윤 영

1993년 강원대학교 자원공학과 학사
1996년 강원대학교 자원공학과 석사
2004년 규슈대학 대학원 지구자원시스템전공 박사

Tel: 010-6242-9577
E-mail: jrhope@empal.com
현재 (주)청석엔지니어링, 터널사업부, 차장

金子 勝比古

1970년 교토대학 자원공학과 학사
1972년 교토대학 자원공학과 석사
1986년 교토대학 공학연구과 박사

E-mail: kaneko@geo-er.eng.hokudai.ac.jp
현재 북해도대학 대학원 공학연구과 교수