

SB발파에서 지발뇌관의 기폭초시오차가 암반파괴과정에 미치는 영향

조상호^{1)*}, 양형식²⁾,金子 勝比古³⁾

Influence of the Initiation Error of the Delay Detonator on the Rock Fracture Process in Smooth Blasting

Sang-Ho Cho, Hyung-Sik Yang and Katsuhiko Kaneko

Abstract Dynamic fracture processes of rock were analyzed to investigate the influence of the initiation error of the delay detonator in smooth blasting. The analysis models for the smooth blasting considered two blast geometries with three charge holes, and the simultaneous initiations without initiation error, with the initiation error of electronic delay detonator and with the initiation error of pyrotechnically delay detonator(DS detonator) were applied to the charge holes. In order to examine the effect of electronic and DS initiation detonator on the smooth blasting, the fracture process results were analyzed statistically.

KeyWords Smooth Blasting, Initiation error, Fracture process

초 록 SB 발파에서 지발뇌관의 기폭초시 오차가 암반파괴 과정에 미치는 영향을 고찰하기 위해 기하조건이 다른 발파모델에 순발뇌관, 전자뇌관 그리고 DS 뇌관의 기폭초시 오차를 고려하여 SB 발파에서의 암석파괴 과정 해석을 수행하였다. 또한 전자 및 DS지발뇌관을 사용한 SB 발파의 발파효과와 영향인자를 고찰하기 위해서 해석결과를 통계적으로 분석하였다.

핵심어 SB 발파, 기폭초시오차, 파괴과정

1. 서 론

SB 발파(Smooth Blasting) 기술은 1950년대 초 스웨덴에서 개발되어, 1952년에 캐나다에서 사용된 후, 미국의 광산업계에 도입되면서부터 일반화되었다. SB 발파는 파괴영역과 파단면의 크기와 방향, 버력의 입도 등의 발파효과를 제어하기 위해 연구되어 왔으며, 터널 등의 지하공간굴착의 외곽부 발파에서 발파 설계면에 따라서 원활한 파단면을 형성시킴과 동시에 주변암반의 손상을 억제하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한, SB 발파에 의한 여굴의 감소 및 지보의 경감 등으로 인하여 굴착경비의 저감효과를 가져왔다. 특히 장약공의 배치가 최종 파단면 형상에 영향을 미치기 때문에 장약공의 천공은 높은 정도의 평행성이 요구된다. 그리고 일반적으로 장약공 배치는 천공간격(S)과 최소저항

선(W)과의 관계가 $S=0.8W$ 을 만족하도록 S를 60-80 cm 정도의 값이 되도록 하였지만, 최근의 SB 발파에서는 $S=W$ 로 설계되는 경우가 많다. SB 발파를 적용하면 어느 정도 평활한 파단면의 형성과 손상영역의 역제가 기대되지만, 이를 위해서는 균열의 방향과 길이를 억제할 필요가 있다. 또한 SB 발파에서는 근접공 사이에 균열이 연결되어 파단면을 형성하므로 천공의 정확도 및 장약공 배치는 중요하다⁶⁾.

최근에는 핵 폐기물 처분장 및 지하 석유 비축기지 등의 대규모 지하구조물이나 특수구조물을 건설하는 경우, 안전관리의 측면으로부터 정밀한 파단면 제어 및 손상제어가 가능한 SB 발파기술의 확립이 요구되고 있다.

본 연구에서는 SB 발파의 최적설계법의 확립을 목적으로 SB 발파에서 암반파괴 과정을 해석하여, 파단면 형성의 메카니즘에 대하여 검토하였다. 구체적으로는 순발뇌관, 전자식 지발뇌관(전자뇌관)⁴⁾ 그리고 DS 식 지발뇌관의 기폭 초시오차를 기하조건이 다른 발파 조건에 적용시켜, SB 발파에서의 암석파괴과정을 해석하고 균열진전 과정 및 진전 메카니즘을 분석하여

¹⁾ 정회원, 일본 북해도대학 대학원 공학연구과 연구원

²⁾ 정회원, 전남대학교 지구환경시스템공학부 교수

³⁾ 일본 북해도대학 대학원 공학연구과 교수

*교신저자(Corresponding Author): chosh@geo9-er.eng.hokudai.ac.jp

접수일: 2004년 3월 18일

심사 완료일: 2004년 4월 19일

파단면 형성과 손상권 역제의 메카니즘에 대해서 고찰하였다. 그리고, 전자뇌관의 균열제어에 대한 유효성 및 현장에서 통상적으로 사용되는 DS지발뇌관에 의한 SB 발파 효과를 고찰하기 위해서, 파단면의 평할도 및 암반손상영역과 미굴량을 구하여 통계적으로 분석하였다.

2. 암석파괴과정 해석법

본 연구에서는 동적유한요소 해석법과 파괴역학을 기초로 하여 제안된 암석파괴 과정 해석법^{1,2)}을 주로 이용하였다. 이 방법은 균열의 발생, 성장, 결합 등은 요소 경계면의 파괴로서 나타내며, 요소 경계면의 응력은 그 응력 경계면을 포함하는 요소들의 응력 평균값으로 한다. 이 평균값과 요소 경계면의 인장강도의 비(국소위험율)를 계산하여 인장파괴판정에 적용한다. 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다. 암석의 파괴는 그 조직과 밀접한 관계가 있으므로 암석의 파괴를 고려하기 위해서는 암석을 그의 조직으로부터 모델화할 필요가 있으나, 엄밀한 수치해석은 곤란하다. 그러나, 암석의 미시구조는 근사적으로는 어느 미시적 크기인 요소의 집합체로 모델화 할 수 있다. 특히 암석의 미시구조는 극히 불균질하지만 이것은 강도와 탄성계수의 불균일성으로 모사할 수 있다. 단, 파괴의 과정해석에서는 강도 불균일성의 영향에 비해서 탄성계수의 불균일성의 영향이 적으므로 강도만을 불균일성으로 가정한다. 균열 선단 과정 영역을 유한한 강도를 가진 균열면으로 가정하여 취급하면 과정영역의 역학특성은 균열면의 개구변위와 결합력의 관계, 즉 인장연화곡선으로써 표현할 수 있다. 본 해석에서 균열은 분리된 두 개의 경계면으로 취급되기 때문에 균열면에 수직방향으로 압축응력이 작용한 경우에는 개구변위가 음으로 되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 과도폐합이 발생하는 경우에는 균열면상에 대응하는 절점에 대해서 접촉압에 상응하는 절점력을 작용시켜 균열의 개구변위가 영으로 되도록 반복 계산한다. 본 해석은 원리상 요소분할이 해석결과에 영향을 미치므로, 그 영향을 배제하기 위해 가능한 한 요소를 적게 세분화할 필요가 있다. 그 요소의 세분화에 의해 계산용량 및 계산시간이 증가하게 되는데, 계산용량을 줄이기 위해 전체강성방정식의 행렬에서 0이 아닌 성분만을 일차원 배열로 저장시키고, 연립방정식의 계산에는 ICCG법⁷⁾을 채용하여 계산시간을 감소시켰다.

3. SB 발파에서 암반파괴 과정

3.1 해석모델 및 해석조건

해석모델은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 자유면에 평행한 3개의 장약공을 가진 일자유면 발파로 가정하였

다. 또한 발파조건이 균열의 진전과정에 미치는 영향을 검토하기 위해서 장약공 공간격과 최소저항선비가 3대 4, 1대 1인 두 모델을 작성하였다(Fig. 1 참조). 여기서 Model 1의 경우는 최소저항선(W)과 공간격(S)이 각각 45 cm, 60 cm가 되게 하였으며, Model 2는 최소저항선과 공간격을 각각 60 cm, 60 cm로 하였다. 암중은 건전한 화강암으로 가정하였으며, Table 1에 물성치와 해석조건을 나타내었다. 유한요소 모델의 분할은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 하였으며, 계산 시간증분은 0.1 μ s로 하였다. 장약공 내경은 통상 SB 발파 규격인 직경 45 mm로 하였다. 장약공 공벽에 작용하는 폭발생성가스압 P는 등엔트로피 팽창을 가정한 JWJ상태방정식³⁾을 적용하였다.

$$P = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + CV - (\omega + 1) \quad (1)$$

여기서 V는 장약공과 폭약의 체적비이다. 이 체적비에 따라 디카플링 및 장약공의 체적변화에 따른 압력변화를 표현하도록 하였다. 폭약은 SB용 정밀폭약(약경 22 mm)의 JWJ 변수로서 KHT코드에 의한 계산치를 사용

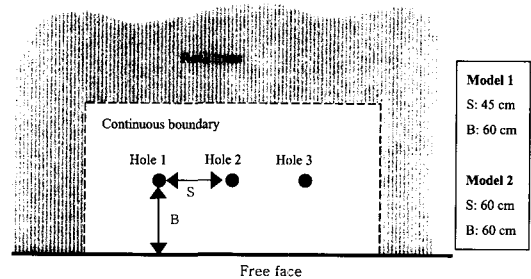
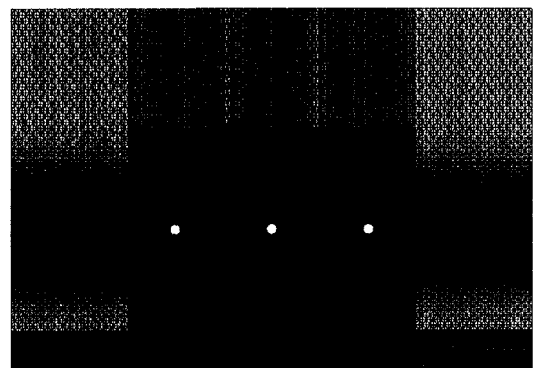


Fig. 1. Geometry of the analysis model for a smooth blasting



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

Fig. 2. The finite element layout for the Model 2

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

Parameters	Value	JWL Parameters	Value
Density ρ (kg/m ³)	2700	Density of explosive ρ_0 (g/cc)	1
Elastic modulus E (GPa)	80	A (GPa)	254.815
Poisson's ratio ν	0.25	B (GPa)	5.578
Average compressive strength S_c (MPa)	250	C (GPa)	0.914
Average tensile strength S_t (MPa)	18	R1	5.66075
Fracture energy G_f (Pa · m)	300	R2	1.48967
Coefficient of uniformity m	5	Ω	0.31713
P wave velocity CP (m/s)	6000	Maximum pressure (MPa)	149

하였다⁵⁾.

전자뇌관과 DS지발뇌관 기폭의 오차를 해석에 적용하기 위해, 모델의 장약공 내 압력의 작용개시 시간을 달리하여 해석을 수행하였다. 또한 두 기폭방식의 결과를 분석하기 위해 순발뇌관 기폭방식 즉 3 공의 장약공 내 압력개시 시간을 동일하게 설정하여 해석을 수행했다. 전자뇌관은 최근 많이 적용되는 기폭방법으로서 기폭초시 오차가 수 백 μ s 이하로 알려져 있다⁵⁾. 그러므로 전자뇌관 기폭의 오차를 고려한 해석에서는 압력의 작용 개시시각을 각 공에 106 μ s, 0 μ s, 126 μ s로 설정하였다. DS 지발뇌관은 기폭오차가 상대적으로 크기 때문에 본 해석에서는 먼저 기폭된 발파공에 의한 파괴(균열진전 등)가 종료되어 응력상태가 안정적으로 되었을 때 다음 장약공의 압력이 작용하도록 설정하였다.

3.2 지발시차의 오차에 따른 암석파괴 과정 해석결과

3.2.1 순발 기폭에 의한 암반파괴과정

순발 기폭조건은 현행의 SB 발파에서 실현하기 어려운 이상적인 발파조건이나, 다른 기폭조건인 파괴과정 결과와 비교하기 위해 먼저 해석을 수행하였다.

두 모델에 순발 기폭을 가정한 해석결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 Model 1의 해석결과로서 최대주응력 분포와 균열을 보여주고 있다. 여기서 압축응력(-)은 흑색, 인장응력(+)은 백색으로 나타내고, 균열은 흑색선으로 표시하였다. 시각은 중심공이 기폭된 시간을 기준으로 한 경과시간이다. 시각 60 μ s에서는 각 장약공이 기폭되어 각 공으로부터 압축의 응력파가 반경방향으로 전파하고, 이에 뒤따라 인장의 응력파가 전파하고 있다. 이 인장응력파에 의해 각 장약공의 공벽으로부터 방사상의 균열이 발생하고 있다. 중심 장약공으로부터 신장한 탁월균열의 선단 부위에 발생한 인장응력집중이 주변 장약공으로부터의 탁월균열선단의 인장응력집중과 만나고 있다. 동시에 이 인장응력 집중영역(장약공 사이)의 상하에 압축응력이 집중되고 있다. 시각 90 μ s에서 이 압축응력은 근접한 장약공의 배면부와 자유면 방향의 균열신장을 억제하고, 특히

장약공 간의 인장응력과 상하부 압축응력 집중의 영향으로 장약공들 사이의 균열들이 신장하여 연결되었음을 알 수 있다. 게다가 다음 시각에서는 압축이었던 반경방향의 응력파가 자유면에서 반사되면서 인장으로 바뀌게 된다. 이 반사 인장 응력파는 장약공간을 연결하는 균열에 도달하여 균열신장을 촉진시키는 영향을 주게 된다. 이 결과로부터 순발기폭에서는 응력파 간섭효과로부터 장약공들 사이로 균열제어가 가능함을 알 수 있었다. Fig. 3(b)는 Model 2의 해석결과로서 Model 1과 유사한 해석결과를 보여주고 있다. 단 장약공들 사이에 발생한 탁월균열의 연결성이 Model 1에 비해 약하다는 것을 볼 수 있다. 이것은 공간격이 멀어져 응력간섭효과가 약해지면서 발생한 결과로 해석된다.

위의 결과를 정리하면, 순발기폭에서는 서로 근접한 발파공으로부터 발생한 응력파의 간섭에 의해, 공간에 인장응력이 집중함과 동시에 그 상하부에 압축영역이 발생한다. 그 결과, 공간을 연결하는 방향의 균열이 탁월하게 신장하고 파단면이 형성되며, 암반의 주변손상은 제어된다.

3.2.2 전자뇌관 기폭에 의한 암반파괴과정

Fig. 4(a)는 Model 1의 각 공에 106 μ s, 0 μ s, 126 μ s의 기폭에 의한 해석결과를 보여주고 있다. 먼저, 그림으로부터 중앙 장약공이 기폭되어, 중앙 장약공벽으로부터 발생한 압축파의 후방에 인장응력파가 발생하여 뒤 따르고, 이 응력파가 진행함과 동시에 균열이 방사상으로 발생하고 있음을 볼 수 있다. 시각 120 μ s에서는 근접 장약공(좌측 장약공)이 기폭되어 균열이 방사상으로 발생하기 시작하고 있다. 여기서 발생한 응력파는 중앙장약공으로부터 전파해온 응력파와 간섭이 발생하고 있다. 시각 180 μ s에서는 나머지 장약공(우측 장약공)으로부터 발생한 균열을 볼 수 있으며, 장약공사이의 상하에 압축응력의 집중을 찾아 볼 수 있다. 이 압축응력은 Fig. 3(a)에서와 마찬가지로 장약공사이의 균열을 진전시키는 역할을 하여, 시각 230 μ s에서는 장약공 사이의 균열이 완전히 연결되었다. Fig. 5(a)는 Model 2의 각

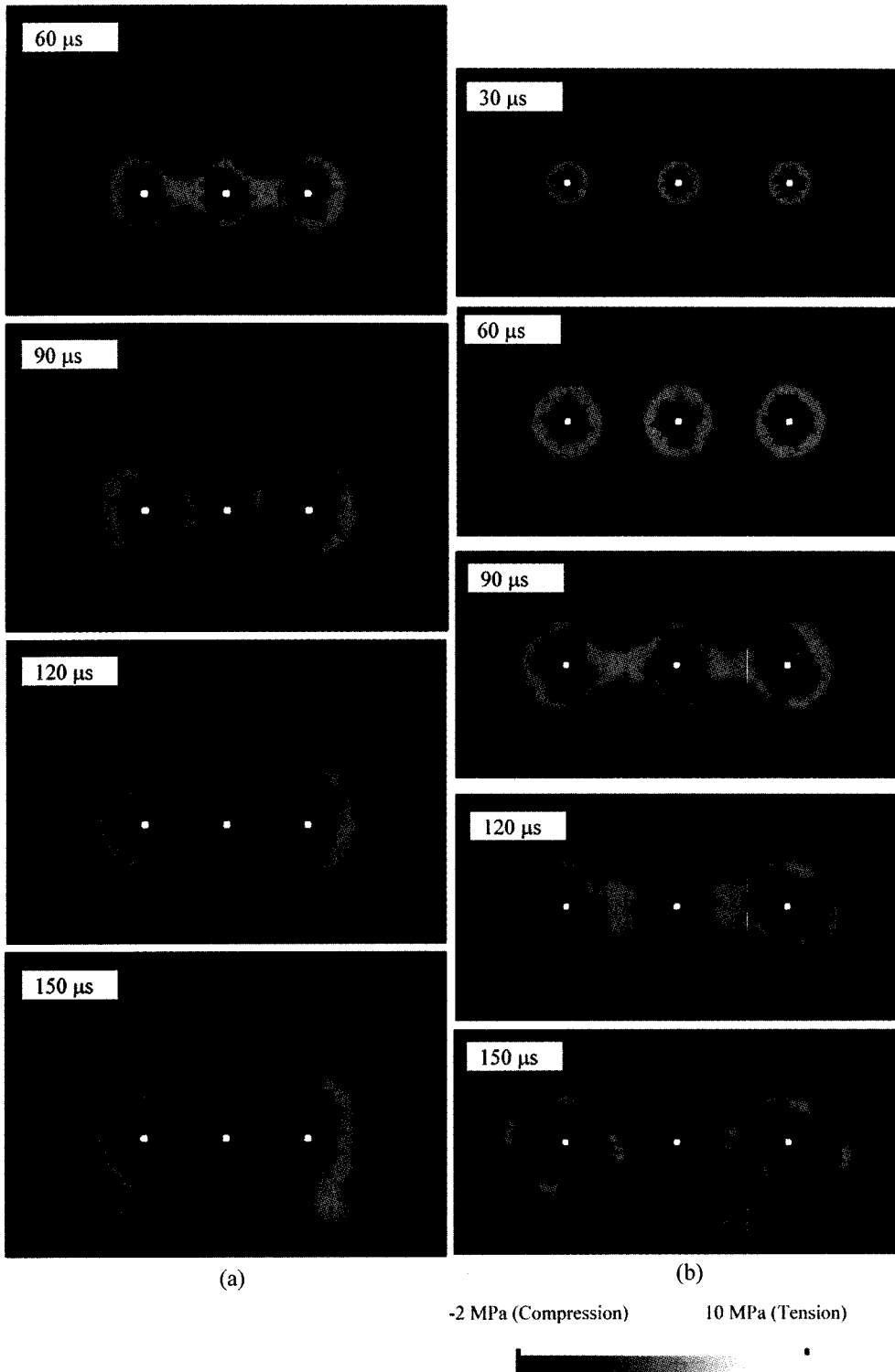


Fig. 3. Distribution of the maximum principal stress and crack propagation in (a) Model 1 and (b) Model 2 considering the simultaneous initiation

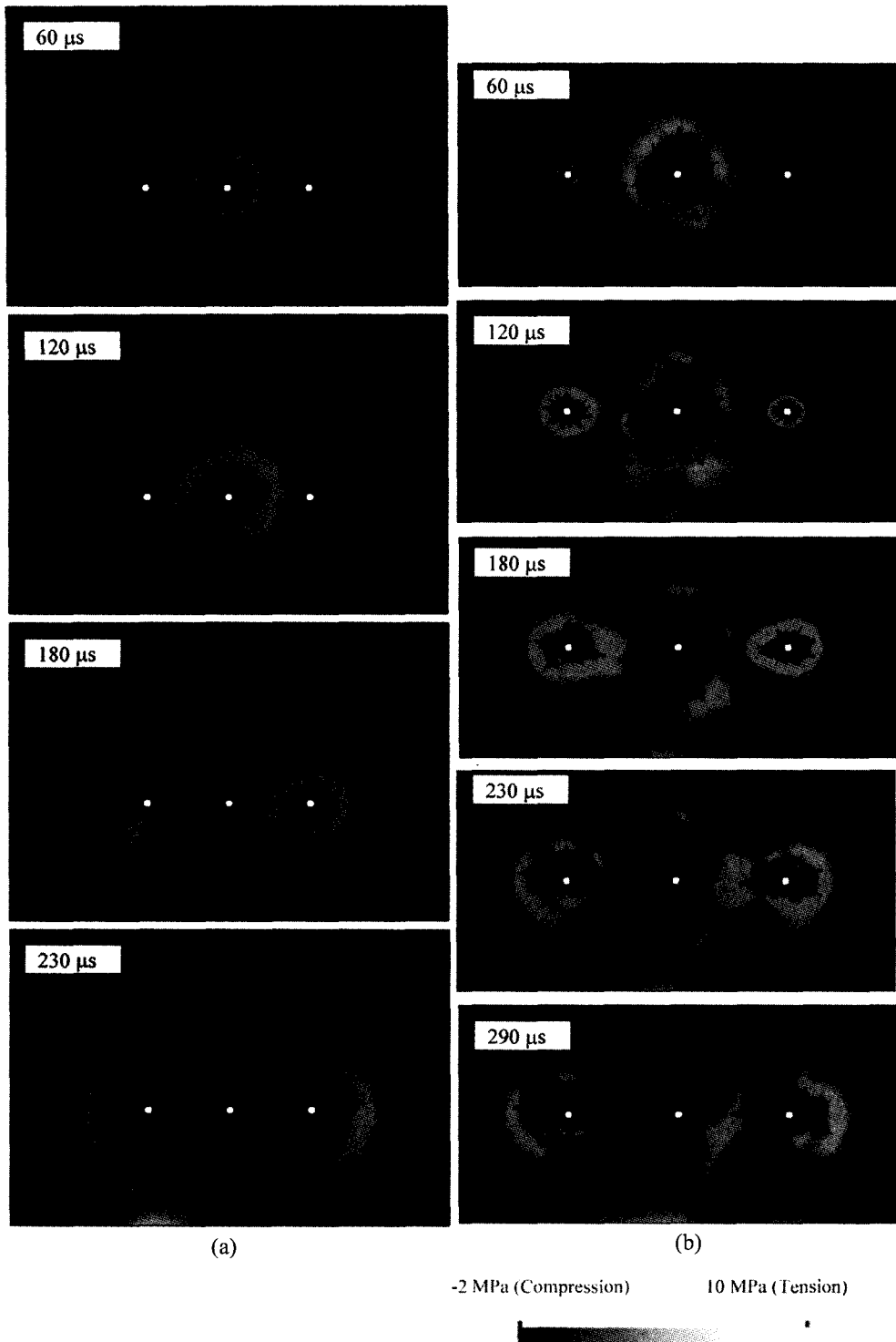


Fig. 4. Distribution of the maximum principal stress and crack propagation in (a) Model 1 and (b) Model 2 considering the electronic initiation

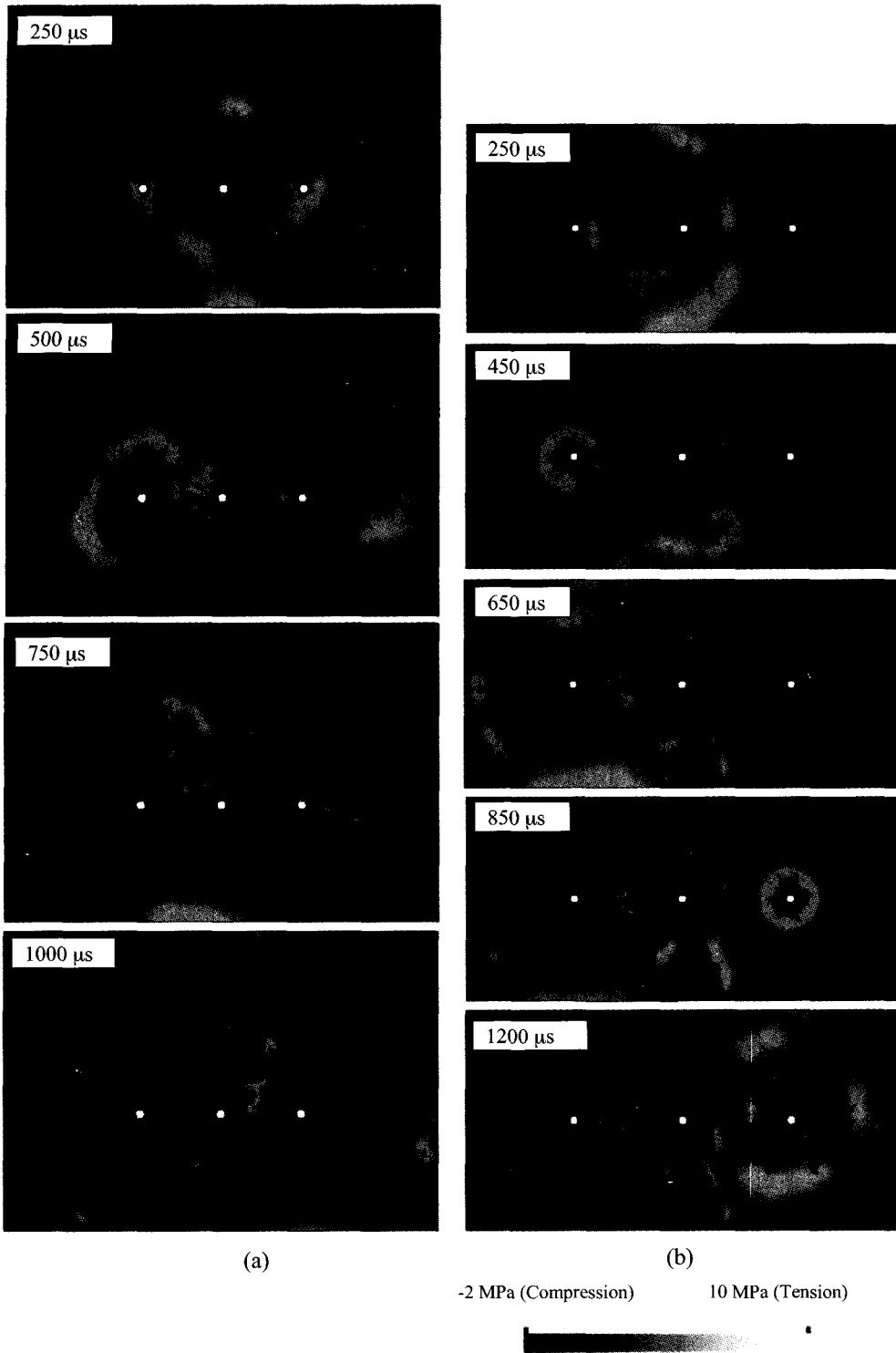


Fig. 5. Distribution of the maximum principal stress and crack propagation in (a) Model 1 and (b) Model 2 considering the DS initiation

공에 $106 \mu s$, $0 \mu s$, $126 \mu s$ 의 기폭을 고려한 해석결과를 보여주고 있다. 여기에서는 응력파의 분포는 Fig. 4(a)와 유사하나 균열의 진전은 약간 다르게 나타나고 있다. 이 결과도 역시 공간격이 멀어져 응력간섭효과가 약해지면서 발생한 결과로 판단된다.

정리하면, 전자뇌관 기폭에서는 선행하여 기폭된 발파공으로부터 형성된 응력장의 영향 하에서 근접공이 기폭되기 때문에, 이 응력장에서 간섭이 발생하여 장약공 사이에서 인장응력이 집중되고 동시에 좌측 장약공의 상하부에 압축응력 집중영역이 형성된다. 그 결과, 장약공 사이를 연결하는 균열이 월등하게 신장하여 파단면이 형성되며, 게다가 후속으로 기폭된 좌우장약공 주변에 발생하는 압반손상이 제어되었다. 단, 선행하여 기폭된 장약공으로부터의 균열진전방향은 후속해서 기폭되어 발생한 응력파의 간섭이 있을 때 까지 균열제어가 어렵기 때문에, 선행해서 기폭된 장약공(중앙 장약공)은 후속해서 기폭된 장약공에 비교해서 압반 배면부에 균열이 신장하게 된다.

3.2.3 DS 지발뇌관 기폭에 의한 압반파괴과정

Fig. 5(a)는 Model 1에 DS지발뇌관의 기폭오차를 고려한 해석결과를 나타내고 있다. 시각 $250 \mu s$ 에서는 중앙 장약공이 선행해서 기폭되어 상당수의 균열이 장약공의 주변에 방사상으로 발생하여, 그 중 5개의 탁월균열이 신장하고 있음을 보여 주고 있다. 여기서 탁월균열의 선단 부위에는 인장응력의 집중이 보이나 균열 주변에서는 응력해방이 발생하고 있다. 특히 좌우측공 방향으로 진전하는 탁월균열의 경우, 자유면으로부터의 반사 인장응력파의 영향으로 균열의 선단부에 인장응력의 집중이 강하게 나타나고, 주변공 주변에 발생한 응력파의 간섭이 보이고 있다. 이 시각에서 좌우측 공벽에 압력이 작용하지 않고 있으나, 주변공의 공벽에 응력집중이 발생하여 균열이 발생하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 선행하여 기폭된 장약공으로부터 발생한 응력파의 영향으로, 주변공의 주변에 인장응력이 집중되어 균열을 발생시켜 파단면을 형성시키는 Guide hole 효과로 볼 수 있다. 시각 $500 \mu s$ 에서는 좌측 장약공이 기폭하여 방사상 균열들이 진전하여 중앙 장약공으로부터의 탁월균열과 연결되어 파단면을 형성하고 있다. 특히 선행하여 발생한 탁월균열의 영향으로 자유면 방향의 균열 진전이 억제되고 있음을 알 수 있다. 또한 선행하여 진전하는 탁월균열은 후속해서 발생한 응력파의 영향으로 자유면 방향으로 진전하고 있다. 우측 장약공으로부터 발생한 선재균열(Guide hole 효과로 발생한 Pre-crack)은 주변공들로부터의 응력파에 의해 진전

되었음을 알 수 있다(시각 $700 \mu s$). 시각 $1000 \mu s$ 에서는 우측 장약공이 기폭하여 방사상의 균열이 진전하고, 이전에 발생된 선재균열 등을 진전시키고 있음을 보이고 있다. 이 결과로부터, DS지발뇌관에 의한 SB 발파에서는 반사 인장파에 의한 주변공 방향의 탁월균열의 신장과 주변공에 의해 발생하는 Guide hole 효과는 중요한 파단면 형성요인이라고 할 수 있다.

Fig. 5(b)는 Model 2에 DS지발뇌관의 기폭오차를 고려한 해석결과로서, Fig. 5(a)와 비슷하게 중앙 장약공으로부터 5개의 탁월균열이 발생하여 두개는 자유면 방향, 2개는 양 주변공 방향, 하나는 장약공 배면으로 향하고 있다. 이 중 좌측으로 향한 탁월균열의 경우, 후속으로 기폭된 좌측 장약공으로부터 발생한 균열과 결합하여 파단면을 형성하게 된다($450 \mu s$). 우측 장약공 방향으로 신장한 탁월균열의 경우, Fig. 5(b)와는 달리 우측 장약공과 균열이 연결되지 않고, 시각 $1200 \mu s$ 에서도 우측 장약공의 균열과 연결되지 않고 파단면을 형성시키지 못하였다. 위의 결과로부터, DS 지발뇌관 기폭에서는 자유면으로부터의 반사파의 영향으로부터 자유면과 직교 또는 평행한 방향으로 탁월균열이 발생하게 되는데, 이는 선행 기폭된 발파공으로부터 발생한 탁월균열의 방향과 자유면의 존재는 밀접한 관계가 있음을 보여 주고 있다. 또한 후속 기폭하는 장약공으로부터 신장하는 탁월균열은 선행 기폭된 장약공으로부터 발생한 탁월균열의 영향을 크게 받는다. 다시 말하면 후속 기폭된 발파공으로부터 신장하는 균열(좌측 장약공 방향)의 선단이 선행기폭에 의해 발생한 균열에 어느 정도 접근하게 되면 양 균열간에 응력간섭이 발생하여 양 균열이 결합하게 된다. 그러나 이와 같은 조건이 성립하지 않는 경우(우측 장약공 방향)에는 균열이 결합하지 않는다. 따라서, 공 간격이 멀어지면 균열이 장약공 사이를 결합하는 가능성이 줄어들게 된다.

추가로, Fig. 5(a)와 (b)에 자유면 방향으로 발생한 탁월 균열들을 살펴보면 균열터를 형성하고 있는데, 이는 일반 벤치발파에서 발생하는 현상이다. 그리고 Fig. 5(b)의 시각 $450 \mu s$ 에서 자유면에 발생한 수직균열의 경우는 실험과 이론적으로 밝혀진 현상이다⁴⁾.

4. SB 발파 효과와 영향인자에 관한 고찰

SB 발파에서의 균열진전 과정과 메카니즘에 대해서 전장에서 설명하였다. 본 장에서는 전장의 해석결과를 토대로 공 간격, 저항선, 기폭방법이 SB 발파에서 최종 단면 형성 및 손상영역 크기에 미치는 영향을 분석 및 고찰하였다. 구체적으로는 전장에서의 해석은 3종류의

기폭방법에 따른 2종류의 모델을 해석하였으나, 암반의 불균질성을 고려함과 동시에 SB 발파의 효과 및 이에 미치는 영향인자를 고찰하기 위해 각 모델의 요소에 주어지는 미시강도의 불균일성^{1,2)}에 대해 난수를 발생시켜 각각 다른 미시강도 분포를 가진 각각10개의 모델에 대하여 총 60회의 해석을 수행하였다. 이 결과들을 이용하여 파단면의 평활도, 손상권 영역, 미굴량에 대해서 통계적 분석을 하였다.

4.1 파단면의 평활도

전장의 결과로부터 알 수 있듯이 최종 파단면은 기폭이 심하고 복잡한 형상을 하고 있는 경우가 많다. 파단면 형상을 정량적으로 표현하기 위해서 Fig. 6과 같이 설계 파단면을 기준으로 여기에 수직인 방향으로 설계 파단면으로부터 최종 파단면까지 최대거리(D_{max})를 이용하여 파단면의 평활정도를 정량화하였다. 여기서 D_{max} 는 통상의 발파시공에서의 여굴 및 미굴량 합에 대응된다. D_{max} 의 값은 여굴의 경우 정(+)이 되고 미굴은 부(-)가 된다. 각 기폭방법 및 발파 기하조건에 따른 파단면의 평활정도를 비교하기 위해서 파단면 평활도를 최종파단면과 설계파단면의 최대거리의 평균값 즉

파단면 거칠기로 하고 다음과 같이 정의한다.

$$\overline{D_{max}^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum D_{max}^2} \tag{2}$$

Fig. 7은 기폭방법에 따른 파단면 거칠기와 공간격과 관계를 나타내고 있다. 순발기폭과 전자뇌관기폭의 경우는 공 간격이 증가함에 따라 파단면 거칠기가 증가하여 파단면의 정도가 저하하고 있음을 보여 주고 있다. 특히 같은 기폭방식에 있어서 파단면 평활도는 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 이에 비해서 DS지발뇌관 기폭의 경우에는 파단면 거칠기가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 DS지발뇌관 기폭에서는 응력간섭에 의한 균열제어 효과가 기대하기 어렵기 때문에 설계 파단면에 가까운 파단면을 형성시키기 어려움을 보여 주고 있다. 또한 기폭방법에 관계없이 공 간격이 증가함에 따라 평활도가 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이는 공 간격을 증가시키면 SB 발파 효과가 감소될 수 있음을 보여주었다.

위의 결과로부터, 파단면의 평활성은 기폭초시정도 및 공 간격에 강하게 의존한다. 특히 초시기폭정도가 크게 되면 파단면의 평활도는 향상되고 공 간격이 증대하면 파단면의 평활성은 저하된다. DS뇌관기폭의 경우 공 간격이 증대하면 파단면이 형성되기 어려워지게 된다.

4.2 암반의 손상영역

SB 발파에 의해 평활한 파단면이 형성되었을 지라도 설계 파단면의 배면부에도 균열이 발생하게 된다. 이 균열이 발생된 영역은 통상 손상영역이라 한다. 여기에

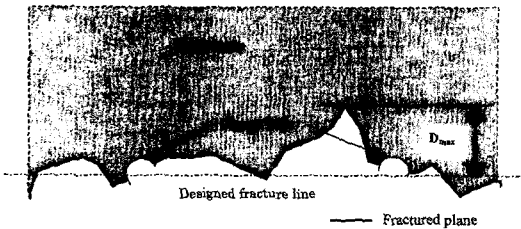


Fig. 6. Definition of the fracture smoothness

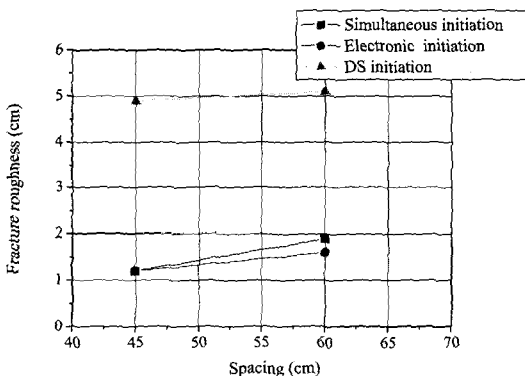


Fig. 7. Variation of the fracture roughness with spacing increasing in different initiations

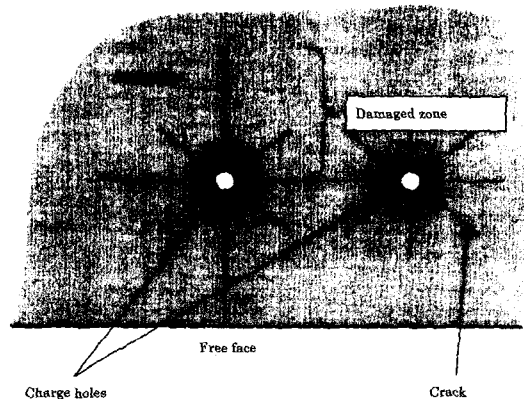


Fig. 8. Definition of the size of the damaged zone in the rock mass

서는 해석결과를 바탕으로 손상영역의 크기와 기폭방법과의 관계를 분석하고 손상영역 제어방법에 대해서 논하기로 한다. 손상영역은 체적 등으로 정의되지만, 여기에서는 정량화를 간단히 하기 위해 그림 8과 같이 배면부에 발달한 균열들 중에서 설계 파단면으로부터 가장 길게 발달한 균열의 길이를 손상영역의 크기로 정의하기로 한다.

Fig. 9는 Model 1의 경우 기폭조건에 따른 해석결과를 손상영역의 크기에 따른 빈도수로 보여주고 있다. 살펴보면, 순발기폭과 전자뇌관 기폭의 손상영역은 최대 40 cm인 반면 DS지발뇌관 기폭의 손상영역의 크기는 60 cm를 보였다. 특히 순발기폭에서는 손상영역의 크기가 20 cm이하가 되는 경우가 많은 것은 주목할 만하다. Fig. 10은 Model 2의 결과로서 Model 1과 비슷

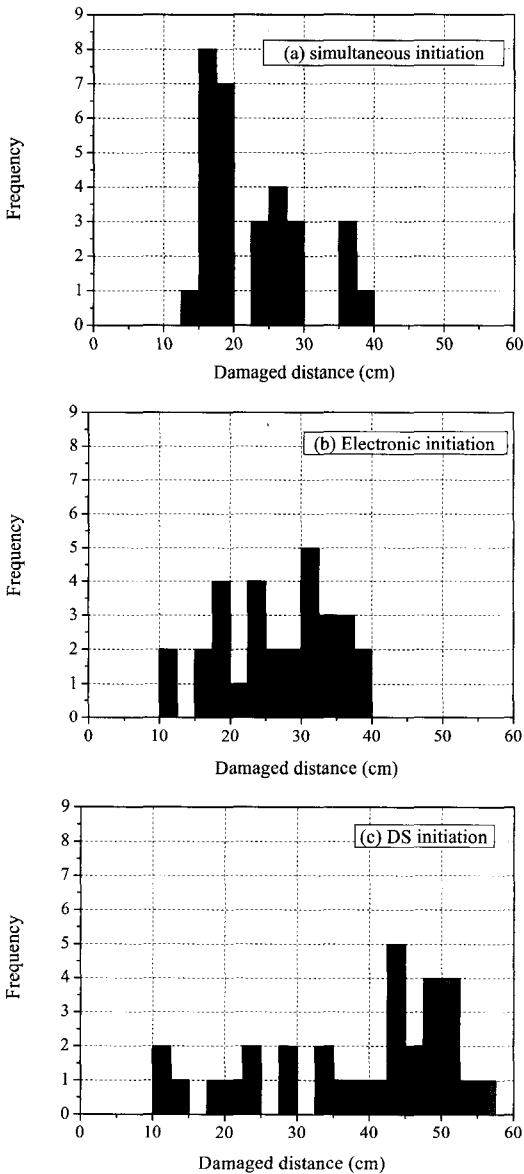


Fig. 9. Comparison of the damaged zones for (a) simultaneous initiation, (b) Electronic initiation and (c) DS initiation in Model 1

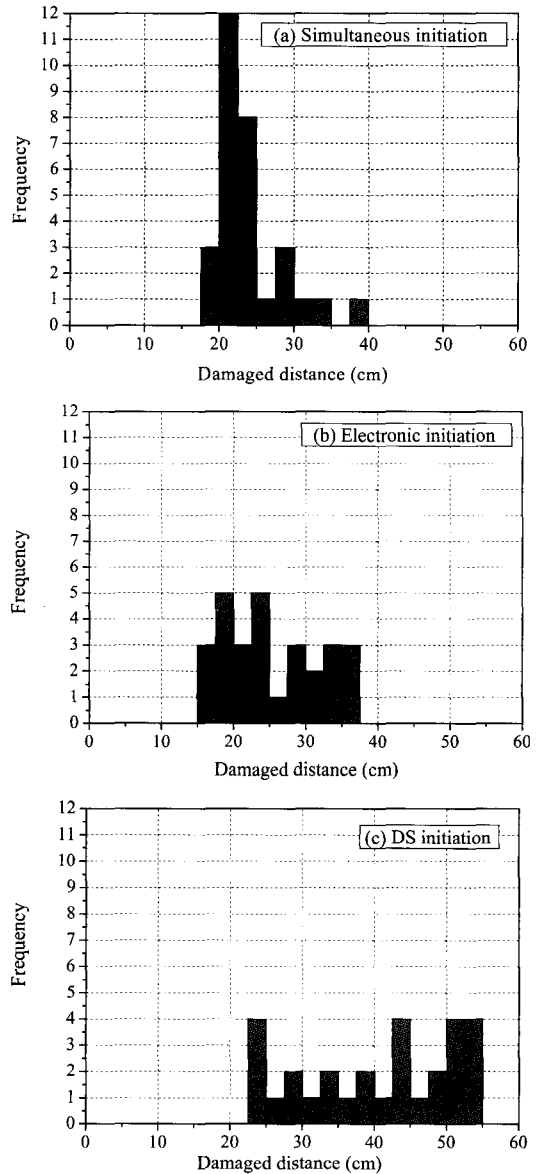


Fig. 10. Comparison of the damaged zones for (a) simultaneous initiation, (b) Electronic initiation and (c) DS initiation in Model 2

하게 손상영역의 크기는 20-40 cm의 범위를 보이고 있다. 특히 순발의 경우에는 20 cm에서 가장 큰 빈도수를 보여, 공 간격이 증가함에 따라 손상영역이 증가함을 보여 주었다. 또한 DS 지발뇌관 기폭에서는 손상영역의 크기가 60 cm 이상에서 큰 빈도수를 나타내고 있다.

위의 결과에서 순발기폭과 전자뇌관기폭을 비교했을 때, 전자는 후자보다도 적은 손상영역의 빈도를 보여 주었다. 즉 순발기폭과 전자뇌관기폭에서 파단면의 평활도에 큰 변화가 없었으나 손상영역의 크기에는 비교적 큰 차이를 볼 수 있다. 이 차이의 원인으로서는 순발기폭의 해석결과(Fig. 3) 중 중앙장약공의 배면부로 진전하는 탁월균열을 들 수 있다. 순발발파의 경우 중앙장약공은 주변 장약공으로부터 전파되어온 응력파의 간섭효과를 받음으로써 손상영역이 제어된다. 전자뇌관의 경우(Fig. 4), 선행 기폭된 중앙 장약공에 대해서는 주변 장약공으로부터의 응력파의 간섭을 받지 못하므로 배면부 암반에 균열이 발생하는 결과를 초래하게 되었다.

손상영역은 기폭초시의 정밀도에 크게 의존하며, 공 간격의 영향을 받는다. 특히 순발이나 전자뇌관처럼 기폭초시정도가 높은 경우에는 통상적으로 사용되는 DS 지발뇌관의 경우와 비교해서 손상영역을 대폭 제어할 수 있을 것으로 생각된다.

4.3 미굴 빈도

SB 발파에서는 최종적으로 파단면이 어떻게 설계 파단면을 따라서 형성되었는지가 중요하다. 그리고 설계 파단면으로부터 배면부까지 굴착된 경우는 여굴, 설계 파단면이 최종 파단면에 도달하지 못하였을 경우에는 미굴이라고 칭한다(Fig. 11). 특히 미굴이 발생한 경우에는 추가굴착과 부석처리 작업이 필요하게 되어 굴진 속도와 굴착비용 등에 악영향을 미친다. 미굴의 발생 정도를 알아보기 위해, 각종 기폭방식에 따른 미굴, 여굴의 빈도를 구하여 각각 Table 2에 나타내었다. 먼저 순발의 결과로 보면, 공 간격이 적은 Model 1에서는 여굴

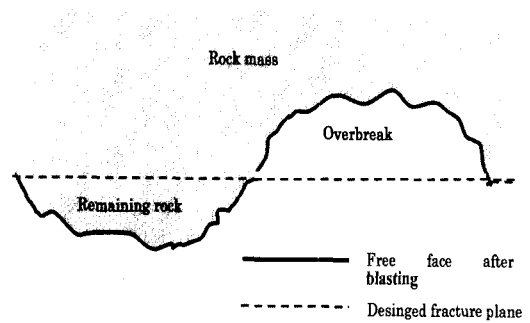


Fig. 11. Definition of the overbreak and remaining rock

의 발생수가 많으며, 미굴 발생률은 15% 정도였으나 Model 2에서는 60%로 증가되었다. 전자뇌관기폭의 경우에는 미굴 발생률에 큰 변화를 보이지 않았다. 이것은 미굴 발생률이 공 간격의 변화에 큰 영향을 받지 않을 가능성을 보여주고 있다. DS 지발뇌관 기폭의 경우에는 전자뇌관 기폭의 경우와 미굴률이 35% 이내로 여굴의 발생빈도가 높게 나타났다. 단 전자뇌관 기폭과의 차이점은 동일한 미굴률이라도 평활도의 절대치가 높은 점이다. 따라서 이상의 결과로부터 순발기폭에서 공 간격이 60 cm인 경우를 제외하면 각 기폭방법에 관계없이 미굴 발생률은 50% 이내임을 알 수 있다. 또한 SB 발파에 의한 발파굴착에서는 여굴이 많이 발생될 가능성을 설명하고 있다.

이로부터, 현행 현장에서 DS 지발뇌관 기폭을 사용하더라도 대체적으로 원활한 파단면을 형성시킬 수 있는 한가지 원인을 정량적으로 설명할 수 있었다. 또한 실제 터널의 경우 초기지압의 영향으로 인해 터널주변의 원주 방향으로 발생하는 인장응력(hoop stress)은 파단면 형성에 도움이 되는 또 하나의 요인으로 잘 알려져 있다. 그러나 정밀한 파단면의 제어 및 손상제어 등을 고려해야 할 경우에는 SB 발파공은 순발에 가까운 전자뇌관 등의 고정밀도 기폭초시에 의한 파단면 제어가 불가피 하다고 사료된다.

Table 2. Estimation of the remaining rock for two models with different delay times

Initiation type	Model	Overbreak	Remaining rock	Remaining rock ratio(%)
Simultaneous	Model 1	3	17	15
	Model 2	12	8	60
Electronic	Model 1	5	15	25
	Model 2	4	16	20
DS	Model 1	4	16	20
	Model 2	7	12	35

5. 결 론

본 해석에서는 SB발파에서 암석 파쇄과정을 수치해석적으로 검토하여, 그 균열진전 메커니즘에 대해서 고찰하였다. 본 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

순발기폭에서는 서로 근접한 발파공으로부터 발생한 응력파의 간섭에 의해, 공간에 인장응력이 집중함과 동시에 그 상하부에 압축영역이 발생한다. 그 결과, 공간을 연결하는 방향의 균열이 탁월하게 신장하고 파단면이 형성되며, 암반의 주변손상은 제어된다.

전자뇌관의 기폭초시오차를 고려한 경우에는 선행하여 기폭된 발파공으로부터 형성된 응력장의 영향 하에서 근접공이 기폭되기 때문에, 이 응력장에서 간섭이 발생하여 공간에 인장응력이 집중함과 후속으로 기폭된 근접 장약공의 상하부에 압축응력 집중영역이 형성된다. 그 결과, 공간을 연결하는 균열이 탁월하게 신장하여 파단면이 형성되고, 후속으로 기폭된 발파공에 대해서는 암반의 주변손상이 제어되었다.

DS 지발뇌관의 기폭초시오차를 고려한 경우에는, 자유면으로부터의 반사파의 영향으로부터 자유면과 직교 또는 평행한 방향으로 탁월균열이 발생하게 되는데, 이는 선행 기폭된 발파공으로부터 발생된 탁월균열의 방향과 자유면의 존재가 밀접한 관계임을 보여 주고 있다. 또한 후속 기폭하는 장약공으로부터 신장하는 탁월균열은 선행 기폭된 장약공으로부터 발생된 탁월균열의 영향을 크게 받는다. 즉 후속기폭된 발파공으로부터 신장하는 균열의 선단이 선행기폭에 의해 발생된 균열에 어느 정도 접근하게 되면 양 균열간에 응력간섭이 발생하여 양 균열이 결합하게 된다. 그러나 이와 같은 조건이 성립하지 않는 경우에는 균열이 결합하지 않는다. 따라서, 공 간격이 멀어지면 균열이 장약공 사이를 결합하는 가능성이 저하하게 된다.

SB 발파에서 최종단면 형성 및 손상영역 크기에 미치는 영향을 분석, 고찰하였다. 파단면의 평활성은 기폭

초시정도 및 공 간격에 강하게 의존한다. 특히 기폭초시정도가 크게 되면 파단면의 평활도는 향상되고 공 간격이 증대하면 파단면의 평활성은 저하된다. DS뇌관기폭의 경우 공 간격이 증대하면 파단면이 형성되기 어려워지게 된다. 손상영역의 크기는 기폭초시의 정밀도에 크게 의존하며, 공 간격의 영향을 받는다. 특히 순발 및 전자뇌관 등의 기폭초시정도가 높은 경우에는 통상적으로 사용되는 DS지발뇌관의 경우와 비교해서 손상영역을 제어할 수 있음을 이론적으로 보여 주었다. 미굴의 발생빈도에 대한 고찰에서는, 순발기폭에서 공간격이 60 cm인 경우를 제외하면 각 기폭방법에 관계없이 미굴 발생률은 50%이내 임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Cho S.H., Y. Ogata and K. Kaneko, 2003, Strain rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 40.5, 763-777.
2. Cho S. H., H. S. Yang and K. Kaneko, 2003, Influence of inhomogeneity on the static tensile strength of rock, *Tunnel and Underground*, 13.2, 1-5.
3. Lee, E.L., H.C. Hornig & J.K. Kury, 1968, Adiabatic expansion of high explosive detonation products. UCRL-50412, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 1968.
4. Sassa, K. & I. Ito, 1966. Dynamic stresses induced within rock in case of blasting with one free face. *Transaction of the Society of Mining Engineer*: Vol. 235, 167-178
5. 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 [in Japanese].
6. 日本火藥學會 發破專門部會, 現場技術者を 위한 發破 핸드북, 共立出版.
7. 小國力 編著, 1991, 行列計算 소프트웨어, 丸善株式會社, 200-207.



조 상 호

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

Tel: +81-11-706-6325

E-mail: chosh@geo-er.eng.hokudai.ac.jp

현재 북해도대학 대학원 공학연구과 연구원



양 형 식

1979년 서울대학교 자원공학과 학사
1981년 서울대학교 자원공학과 석사
1981년 서울대학교 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr

현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

金子 勝比古

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

Tel: +81-11-706-6322

E-mail: kaneko@geo-er.eng.hokudai.ac.jp

현재 북해도대학 대학원 공학연구과 교수

