

U형 장약홀더를 이용한 발파공법에서 지반진동 저감특성 및 파괴효율에 관한 수치해석적 연구

김현수¹⁾, 백범현²⁾, 오세욱³⁾, 한동훈⁴⁾, 조상호⁵⁾*

Numerical Study on Ground Vibration Reduction and Fragmentation in a Controlled Blasting Utilizing Directional U Shape Charge Holder

Hyon-Soo Kim, Beom-Hyun Baek, Se-Wook Oh, Dong-Hun Han, Sang-Ho Cho

Abstract It is necessary to minimize ground vibration and noise due to blasting work in urban environment. The blast induced ground vibration and noise are generally generated by a portion of detonation energy, where most of the energy is utilized for rock breakage and movement of rock mass. Recently a blast method utilizing U-shaped steel charge holder was suggested to reduce the ground vibration without decreasing destructive power toward the free surface. In this study, single hole blasting utilizing U-shaped steel charge holder were simulated and the stress waves caused by the detonation of explosives were monitored using AUTODYN software. In order to examine the fragmentation efficiency of the U-shaped steel charge holder, one free face blasting models which adapt the blast induced stress waves were simulated by dynamic fracture process analysis (DFPA) code. In addition, the general blasting models were also simulated to investigate the fragmentation effectiveness of the U-shaped steel charge holder in rock blasting.

Key words U shape steel charge holder, Blast vibration, AUTODYN, Dynamic fracture process analysis (DFPA)

초 록 도심지나 보안건물과 근접한 곳에서 폭약을 사용하는 발파작업이 수행되는 경우 지반진동 및 소음의 영향을 최소화 시킬 필요가 있다. 이러한 지반진동과 소음은 암반의 천공내에 장전된 폭약이 기폭되며 주변 암반을 파괴하고 남은 일부 충격에너지에 의하여 발생된다. 최근 천공 내 U형 철재장약홀더를 삽입하여 충격파의 전파방향을 제어하여 자유면방향으로 파쇄효과를 유지하며 암반 내로 전파하는 충격진동을 감쇄시키는 발파공법이 제안되었다. 본 연구에서는 U형 철재장약홀더를 적용한 암반발파에서 충격파의 전파특성을 파악하기 위하여, AUTODYN 소프트웨어를 이용하여 장약홀더 내 장전된 폭약의 폭평을 모사하고 주변암반에 전달된 충격파를 측정하였다. 또한 장약홀더 발파의 암파쇄 효과를 파악하기 위하여 동적파괴과정해석코드인 DFPA (Dynamic Fracture Process Analysis)를 적용하여 장약홀더를 이용한 장약조건을 고려한 2자유면 발파를 모사하였다. 일반발파의 장약조건을 고려한 충격파 발생 및 파괴과정해석을 추가적으로 수행하여 장약홀더의 암파쇄효과를 비교하였다.

핵심어 U형 철재 장약홀더, 발파진동, AUTODYN, 동적파괴과정해석코드(DFPA)

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 박사과정

²⁾ (주)범양이엔씨

³⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정

⁴⁾ 신발파기술사사무소

⁵⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2016년 3월 18일

심사 완료일 : 2016년 3월 23일

게재 승인일 : 2016년 3월 24일

1. 서론

발파현장과 주변근접한 거리에 민가나 보안건물이 위치해 있는 경우 발파진동과 소음은 민원 또는 구조물손상을 유발 할 수 있다. 이러한 문제의 발생을 미연에 방지하기 위하여 시험발파를 수행하여 보안건물과 폭원의 이격거리에 따른 허용지발당장약량을 산정하여 본발파에 적용되고 있다. 일반적으로 보통 도심지나 보안건물이 근접할 경우 지발당장약량을 적게 사용하여 발파작업을 수행하므로 지반진동과 소음의 발생을 제어할 수 있으나 적은 비장약량의 사용으로 암반파쇄 효과가 감소되는 단점이 있다. 최용근 외(2000)는 양쪽 방향이 개방된 원형 장약홀더를 사용하여 균열발생을 제어하는 발파공법을 제안하였으며, 장약홀더로서의 이용가치가 있는 재료의 특성에 대하여 연구하였다. 안중량 외(2012)는 간단한 구조의 장약홀더를 콘크리트 내에 삽입하여 적은 폭력으로도 예상되는 방향으로 파단을 제어하는 발파기법을 제안하였다. 최근 천공내 U형 철재장약홀더를 삽입하여 충격파의 전파방향을 제어하여 자유면 방향으로 파쇄효과를 유지하며 암반 내로 전파하는 충격진동을 감쇄시키는 발파공법이 제안되었다.

본 연구에서는 U형 철재장약홀더 내에 장전된 폭약이 폭굉하여 암반내에 발생하는 충격응력 및 전파과정을 수치해석적으로 검토하였다. 이러한 충격파에 의한 2자유면 암반의 파괴과정을 평가하고 U형 철재장약홀더의 진동제어 특성과 파쇄효율에 관한 비교연

구를 수행하였다. 여기서 장약홀더 내 폭약의 폭굉현상 및 암반 내 충격응력의 해석은 AUTODYN 소프트웨어를 사용하였으며, 2자유면 암반의 파괴과정해석은 동적파괴과정해석(DFPA)코드를 이용하였다.

2. 장약홀더 발파공 폭굉현상 전산모사

2.1 개요

충격에너지 방향제어 장약홀더를 이용한 발파공법은 그림 1에서와 같이 자유면 방향으로 개방된 플라 스틱 파이프 및 얇은 철재로 구성된 “U”자 형태의 장약홀더를 장약공 내부에 삽입하고 장약홀더 내부에 폭약이 설치된다. 이러한 구조는 일반장약발파에 의하여 적은 장약량을 사용하게 되지만, 폭발에너지 중 준정적효과에 해당하는 폭발가스의 압력은 장약홀더가 개방되어 있는 자유면 방향에 집중되어 일반장약 발파의 파괴효율을 유지하며 적은 장약량을 사용으로 발파진동감쇠의 저감효과를 가져올 수 있다. 장약홀더 내 폭약의 폭굉과정과 암반내 발생하는 충격파를 획득하기 위하여 ANSYS AUTODYN 소프트웨어를 적용하였다.

AUTODYN은 Lagrange Solver와 Euler Solver 등 구조해석 Solver와 유동해석 Solver 기능을 탑재하고 있기 때문에 폭발반응에 의한 충격파의 발생 및 주변에 미치는 구조재료의 변형해석이 가능하다.

본 연구에서는 FEM modeler를 사용하여 암반 내 장약공에 장약홀더를 설치한 해석모델을 작성하였고,

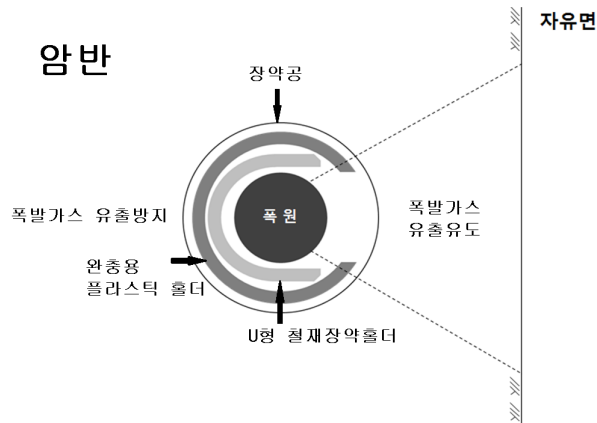


그림 1. U형 장약홀더 폭발가스 방향제어 원리.

장약공으로부터 임의의 거리에서 주응력 및 입자진동 속도를 측정할 수 있도록 측정점을 지정하였다. ANSYS AUTODYN을 사용하여 모델링작업을 수행하였고, 일정거리에 대한 폭약의 폭발압력, 진동속도, 그리고 최대 최소주응력을 측정하였다. 이를 통해 얻어진 데이터를 비선형 파괴역학을 기반으로 개발된 불균질 재료의 파괴시뮬레이션 해석코드인 DFPA(Dynamic Fracture Process Analysis) 유한요소해석코드에 적용하여 암석의 파괴양상을 분석한다(조상호 외 2004).

2.2 해석조건

터널발파에서 심발발파 이후 발파공 상황으로 2 자유면 발파를 가정하여 그림 2와 같이 해석모델로 결정하였다. 그림 2(a)은 Model 1로서 직경 45mm 장약

공 내에 플라스틱 파이프(외경 41mm, 내경 35mm, 두께 3mm)를 삽입하고 안쪽에 철 장약홀더(외경 34mm, 내경 32mm 두께 1mm)를 설치하고 안쪽에 직경 35mm 폭약이 설치된 것을 가정하였다. Model 2(그림 2(b))는 두께 3mm 철재 장약홀더 사용을 제외하면 Model 1과 동일하다. Model 3(그림 2(c))는 일반장약발파를 모사한 것으로 천공경 45mm, 폭약직경 38mm를 적용하였다. 표 1은 해석모델에 사용된 철 부재와 플라스틱의 물성값을 보여주고 있다.

U형 철재 및 플라스틱 장약홀더를 적용한 발파와 일반장약에 의한 발파의 충격파발생 및 입자진동속도 발생특성을 파악하기 위하여 그림 3과 같이 장약공을 중심으로 U형 장약홀더가 열린 전면방향과 후면방향에 계측점을 설치한 단일공발파 해석모델을 작성하였

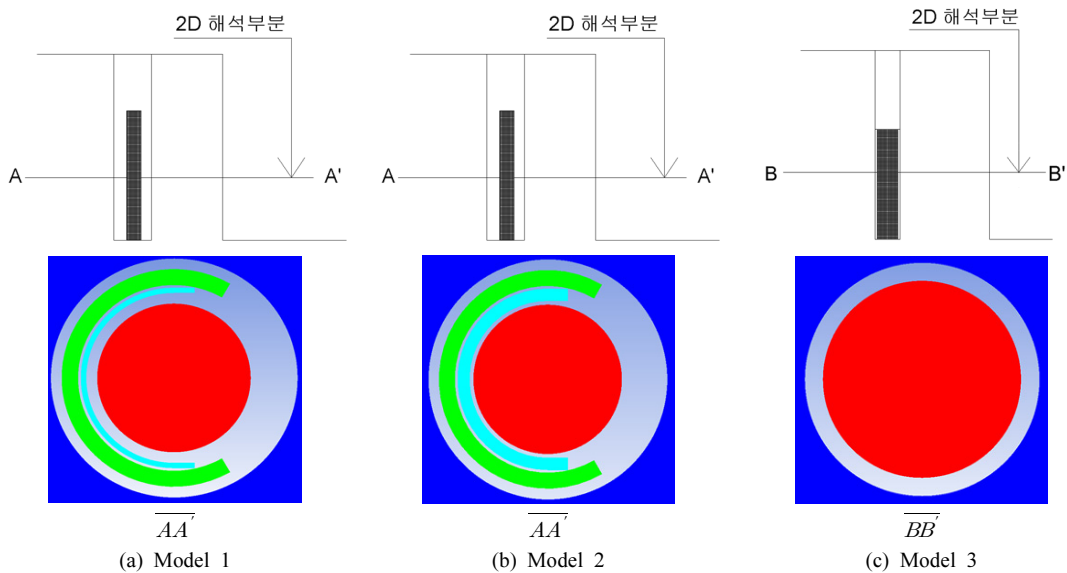


그림 2. 해석모델 별 장약공 내 장약홀더 설치현황.

표 1. 장약홀더 해석모델 입력 물성값

항목	철 부재	플라스틱
밀도(g/cm ³)	7.85	1.2
전단 탄성률(KPa)	7.692308×10 ⁷	1.0×10 ⁶
비열(J/kgK)	434	-
채적탄성률(KPa)	1.666667×10 ⁸	-
변형률	-	1.0×10 ²⁰
기준온도(K)	295.149994	295.149994
그뤼나이젠 계수	-	0.61

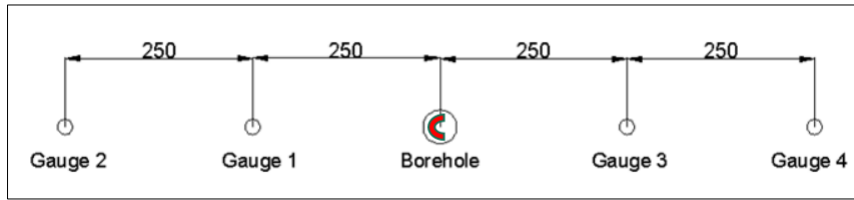


그림 3. 충격방향제어 장약홀더 단일공 발파해석모델(단위: mm).

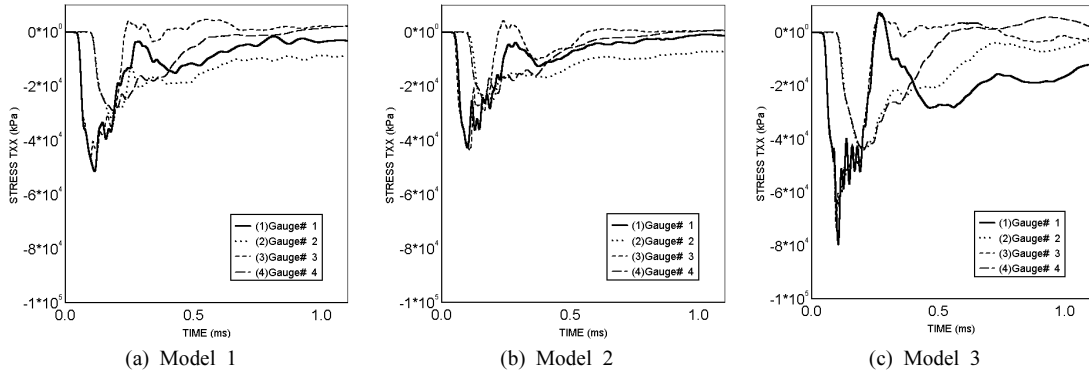


그림 4. 모델 별 장약공 주변 반경방향 최대주응력 이력곡선.

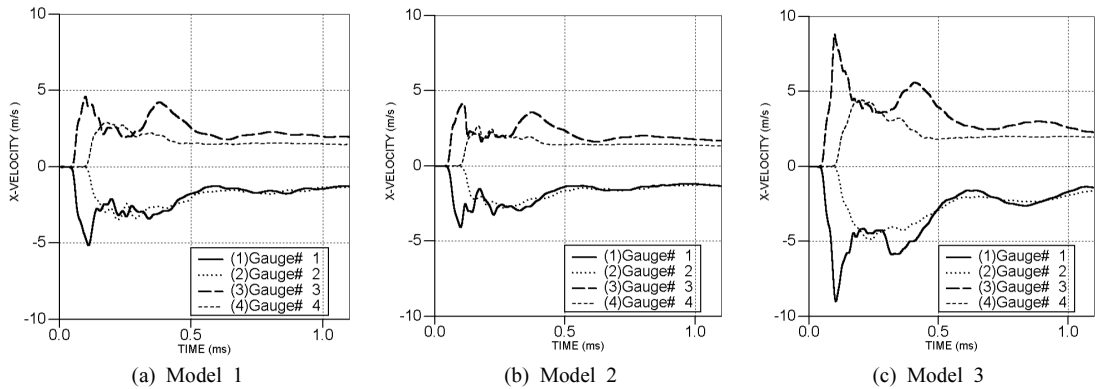


그림 5. 모델 별 장약공 주변 발파진동속도 이력곡선.

다. 장약공을 중심으로 양쪽방향으로 250mm 떨어진 지점에서 Gauge 1과 Gauge 3가 위치하고, 500mm 거리에서 Gauge 2와 Gauge 4를 설치하여 거리별 시간에 따른 진동속도, 최대·최소주응력을 측정하였다. 여기서 계측점 간 또는 계측점과 장약공의 거리를 250mm로 설정한 이유는 본 해석은 파괴기준식을 적용하지 않는 탄성해석으로 거리별 응력파의 감쇠정도를 분별하기 위함이다.

2.3 해석결과 및 진동저감효율 검토

그림 3의 단일공 발파해석모델을 바탕으로 그림 2의 장약공 모델별로 해석한 결과로부터 획득한 반경방향 주응력 및 지반진동속도를 비교하였다. 그림 4는 모델별 각 측정점으로부터 얻은 반경방향 주응력 이력곡선을 나타낸 것으로, 살펴보면 1mm 두께의 철재 장약홀더를 적용한 Model 1의 경우 장약홀더의 설치방향에 관계없이 250mm 이격거리에서 약 52MPa의 최대주응력값을 보였으며, 두께 3mm 철재장약홀

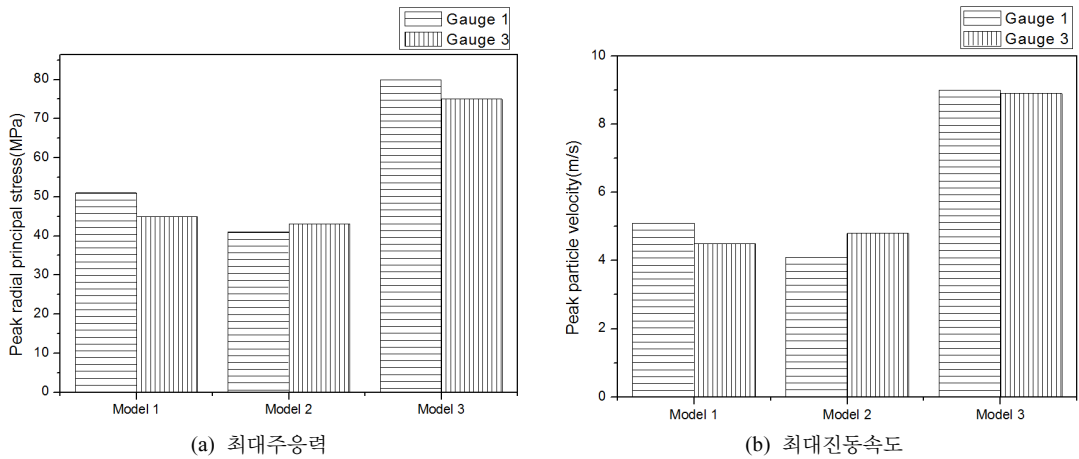


그림 6. 모델 별 최대주응력 및 최대입자진동속도 비교.

더를 적용한 Model 2의 경우에는 약 44MPa를 나타내었다. 즉 철재장약홀더의 두께가 증가함에 따라 발파공 주변에 발생된 충격응력이 감소함을 알 수 있다. 일반장약을 고려한 Model 3의 경우 85MPa의 최대주응력값을 보이며, 다른 장약홀더발파공에 비하여 가장 높은 값을 나타내었다. 그림 5는 모델별 각 측정점으로부터 얻은 반경방향 입자진동속도를 나타낸 것으로, 살펴보면 Model 1의 경우 약 5.0m/s, Model 2의 경우 약 4.8m/s, Model 3의 경우 8.9~9m/s의 진동속도를 보였다.

그림 4와 그림 5에서 보여준 반경방향주응력과 입자진동속도의 최대값을 분석하여 그림 6(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 살펴보면, 일반발파와 비교하여 장약홀더를 사용한 Model 1은 35%, Model 2는 46% 정도 반경방향주응력값이 감소하는 것으로 나타났다. 발파 진동의 경우 일반발파에 비교하여 Model 1은 42%, Model 2는 54% 감소하는 것으로 나타났다.

3. 동적 파괴과정의 해석

3.1 해석모델 및 해석조건

동적파괴과정해석법(Dynamic Fracture Process Analysis)은 Newmark-β법과 비선형 파괴역학을 기초로 하여 개발된 동적 유한요소 해석코드로서 인장균열의 발생, 성장, 결합 등은 요소경계면의 파괴로서 취급하며(그림 7), 요소 경계면의 응력은 그 응력 경계면을

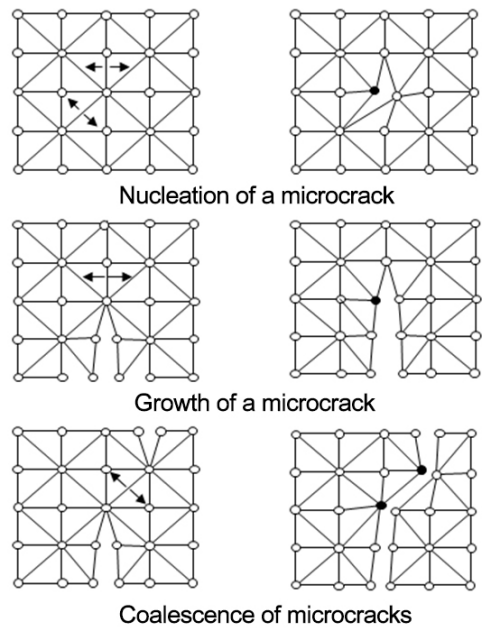


그림 7. 동적파괴과정해석법의 균열 발생과 생성(김현수 외, 2013).

포함하는 요소들의 응력의 평균값을 계산하고 이 평균값과 요소 경계면의 인장강도의 비(국소취함률)를 계산하여 인장파괴판정에 적용한다(조상호 외, 2004). 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다. 암석 파괴는 조직과 밀접한 관계가 있으므로 암석 파괴를 고려하기 위해서는 암석을 조직으로부터 모델화할 필요가 있으나, 정밀한 수치해석은

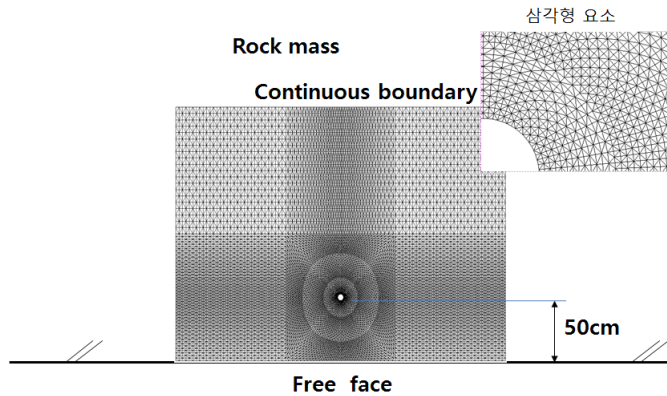


그림 8. 동적 파괴과정 해석모델.

어렵다. 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 표현이 가능하다. 본 해석에 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 전제강성 방정식의 행렬에서 0이 아닌 성분만을 일차원 배열로 저장시키는 전처리법을 ICCG법(공역균배법)에 적용시켜 연립방정식을 고속으로 계산함으로써 계산용량과 계산시간을 크게 감소시켰다.

자유면 발파에 의한 암석 파괴과정 해석에서는 장약홀더 내 폭약의 폭발반응을 모사할 수 없기 때문에 그림 4에서 나타낸 암반 내 충격응력파를 발파원으로

표 2. 동적파괴과정해석법(DFPA)의 물성값

항목	암반
밀도(g/cm^3)	2.86
P파의 탄성과 속도(m/s)	3454
S파의 탄성과 속도(m/s)	1996
포와송비	0.25
영률(GPa)	28.475
압축강도(MPa)	100
인장강도(MPa)	5

적용할 필요가 있다. 그림 8은 터널발파에서 심발발파 이후 장약공 상황으로 2자유면 발파를 가정한 모델로 최소저항선은 500mm를 적용하였다. 표 2는 동적 파괴과정해석의 입력값으로 적용한 암반의 물성이다.

3.2 동적 파괴과정 해석결과

방향제어 장약홀더를 적용한 경우(Model 1)와 일반 발파공법이 적용된 경우(Model 3)에 대한 동적 파괴과정 해석을 수행하였으며, 그림 9 및 그림 10에 각각 나타내었다. 그림 9는 장약홀더 발파에 의한 충격응력파형을 발파원으로 적용한 경우 암반의 파괴과정해석결과로서 발파공 주변에 압축파괴영역(적색영역)이 보이며, 그 외곽영역에 반경방향 인장균열이 발생하여 전파한 양상으로 보이고 있다. 특히 최종적인 파괴 패턴은 자유면 방향으로 탁월균열이 우세하게 생성된 것을 볼 수가 있다. 그림 10은 일반발파를 가정한 경우로서 발파공 주변에 비교적 넓은 압축파괴영역이 보이고 있으며, 그 주변에 반경방향 인장균열이 발생

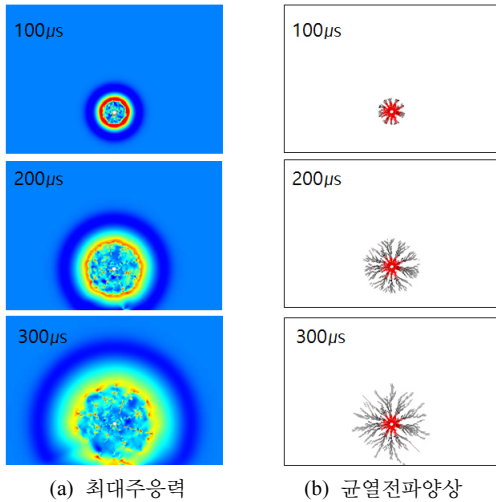


그림 9. 장약홀더 발파를 고려한 동적 파괴과정 해석결과.

하는 양상을 보였다. 결과적으로, 충격방향제어 장약홀더를 적용한 경우 장약공 주변 압축에 대한 압쇄권이 적어 폭발에너지의 감쇄가 적으며, 탁월균열이 발달하여 폭발반응에 의한 폭발가스의 유입이 쉬워져 자유면 방향으로 Crater(신자유면) 형성이 유리해질 것으로 판단된다. 반면에 일반장약공 발파의 경우 장약홀더발파에 비하여 발파공 주변의 압축파괴(압쇄)영역이 넓어 폭발가스 유입이 불리해질 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 U형 철재장약홀더 내에 장전된 폭약이 폭발하여 암반 내에 발생하는 충격응력 및 전파과정을 수치해석적으로 검토하였다. 이러한 충격파에 의한 2자유면 암반의 파괴과정을 평가하고 U형 철재 장약홀더의 진동제어 특성과 파쇄효율에 관한 비교연구를 수행하였다. 여기서 장약홀더 내 폭약의 폭발현상 및 암반 내 충격응력의 해석은 AUTODYN 소프트웨어를 사용하였으며, 2자유면 암반의 파괴과정해석은 동적파괴과정해석(DFPA)코드를 이용하였다. 결과적으로, 1mm 두께의 철재 장약홀더를 사용한 Model 1은 일반장약공을 사용한 경우와 비교하여 35%, Model 2는 46% 정도 충격응력에너지가 감쇠하는 것으로 나타났으며, 입자진동속도의 경우 일반발파에 비교하여

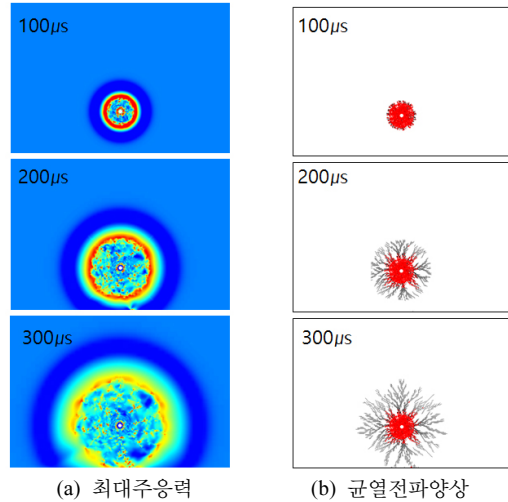


그림 10. 일반발파 장약공을 고려한 동적 파괴과정 해석결과.

Model 1은 42%, Model 2는 54% 감쇠하는 것으로 나타났다. 동적파괴과정해석결과 충격방향제어 장약홀더를 적용한 경우 장약공 주변 압축에 대한 압쇄권이 적어 폭발에너지의 감쇄가 적으며, 탁월균열이 발달하여 폭발반응에 의한 폭발가스의 유입이 쉬워져 자유면 방향으로 Crater(신자유면) 형성될 수 있는 유리한 조건을 보였으며, 일반장약공 발파의 경우는 장약홀더발파에 비하여 발파공 주변의 압축파괴(압쇄)영역이 넓어 폭발가스 유입이 불리한 조건을 나타내었다.

참고문헌

1. 김현수, 강형민, 정상선, 김승곤, 조상호, 2013, 석회암 내 방사상 발파균열을 예측하기 위한 동적파괴과정 해석법의 입력물성 결정법에 관한 연구, 화약 발파 대한 화약발파공학회지, Vol. 31, No. 2, pp. 6-13.
2. 안중량, 김승곤, 석철기, 박훈, 이준호, 조상호, 2012, 간이장약홀더를 이용한 콘크리트 말뚝두부의 동적파쇄에서 발생하는 지반진동과 소음에 관한 연구, 대한화약 발파공학회, 춘계학술발표회 논문집, pp. 67-71.
3. 조상호, 양형식, 가네코 카즈히코, 2004, SB발파에서 지발뇌관의 기폭초시오회가 암반파괴 과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간, Vol. 14 No. 2 pp. 121-132.
4. 최용근, 이정인, 2000, 장약공 노치와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 연구, 한국자원공학회지, 37권 5호, pp. 315-326.

**김 현 수**

전북대학교 자원·에너지공학과
박사과정

Tel: 063-270-2358
E-mail: khs1221@jbnu.ac.kr

**백 범 현**

(주)범양이엔씨 SOC토목사업부 이사

Tel: 02-799-6548
E-mail: bps-100@hanmail.net

**오 세 욱**

전북대학교 자원·에너지공학과
석사과정

Tel: 010-9151-5243
E-mail: oseo5353@naver.com

**한 동 훈**

(주)신발파 기술사사무소 이사

Tel: 02-6446-5677
E-mail: easthun@hanmail.net

**조 상 호**

전북대학교 자원·에너지공학과 교수

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr