

고위력 폭약의 석회암 내 장약공 폭발에 의한 지반진동 전파특성에 관한 연구

김경규¹⁾, 신찬휘¹⁾, 김한림²⁾, 양주석³⁾, 배상호³⁾, 윤경재³⁾, 조상호^{1)2)*}

Propagation Characteristics of Ground Vibration Caused by Blast Hole Explosion of High Explosives in Limestone

Gyeong-Gyu Kim, Chan-Hwi Shin, Han-Lim Kim, Ju-Suk Yang,
Sang-Ho Bae, Kyung-Jae Yun, Sang-Ho Cho

Abstract Recently, the utilization of underground space for research facilities and resource development has been on the rise, expanding development from shallow to deep underground. The establishment of deep underground spaces necessitates a thorough examination of rock stability under conditions of elevated stress and temperature. In instances of greater depth, the stability is influenced not only by the geological structure and discontinuity of rock but also by the propagation of ground vibrations resulting from earthquakes and rock blasting during excavation, causing stress changes in the underground cavity and impacting rock stability. In terms of blasting engineering, empirical regression models and numerical analysis methods are used to predict ground vibration through statistical regression analysis based on measured data. In this study, single-hole blasting was conducted, and the pressure of the blast hole and observation hole and ground vibration were measured. Based on the experimental results, the blast pressure, blasting vibration at a distance, and the response characteristics of the tunnel floor, side walls, and ceiling were analyzed.

Key words High explosive, Single-hole blasting, Blast hole pressure, Ground vibration

초 록 최근 연구시설 및 자원개발 등의 목적으로 지하공간 활용이 증가하고 있으며, 저심도 암반을 넘어 고심도 암반에 대한 개발이 증가하고 있다. 고심도 지하공간 개발은 높은 응력과 높은 온도 조건에서의 암반의 안정성을 고려해야 한다. 고심도의 경우 암반 구조와 불연속면의 상태 등이 안정성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 지진 및 굴착을 위한 암반발파에 의한 지반진동 전파가 지하공동의 응력변화를 발생시켜 암반의 안정성에 영향을 미치게 된다. 발파공학 측면에서 지반진동을 예측하는 방법은 실측 데이터를 바탕으로 통계학적 회귀분석을 통한 경험적 회귀모형과 수치해석적 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 단일공 발파에 의한 폭발압력 전파특성과 지반진동 전파특성에 대한 경험적 회귀모형을 획득하기 위하여 실험적 방법을 통해 연구를 수행하였다.

핵심어 고위력 폭약, 단일공 발파, 발파공 압력, 지반진동

- 1) 전북대학교 공과대학 에너지저장·변환공학대학원
- 2) 전북대학교 공과대학 토목/환경/자원·에너지공학부
- 3) 국방과학연구소

* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접 수 일 : 2023년 12월 11일

심사완료 : 2023년 12월 19일

게재승인 : 2023년 12월 27일

1. 서론

전 세계적으로 에너지저장시설, 연구시설, 방사성폐기물 처분장 및 자원개발 등의 목적으로 고심도 암반을 대상으로 하는 지하공간 개발에 대한 관심이 높아짐에 따라 안정성에 대한 관심이 증가하고 있다. 저심도 암반과 고심도 암반에서의 안정성에 영향을 미치는 요소를 비교해보면, 저심도 암반의 경우, 암반의 지질학적 구조 및 불연속면 특성이 영향을 미치게 된다. 반면에 고심도 암반의 경우, 암반의 지질학적 구조와 불연속면 특성뿐만 아니라 지진 및 굴착을 위한 암반발파 등으로 인한 지반진동 전파가 지하공동의 응력변화를 발생시켜 암반의 안정성에 영향을 미치게 된다(박승훈 외, 2020). 이를 발파공학 측면에서 접근해보면, 지반진동은 화약의 종류, 화약량, 암반의 지질학적 조건, 기폭시차, 발파패턴, 폭원과의 거리 등 다양한 변수들에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이는 해당 지역의 암반 조건에서 발파조건에 따른 지반진동을 실측하는 것이 중요하다는 것을 의미하지만, 지반진동에 영향을 주는 변수들을 모두 고려하는 것은 사실상 불가능하다(최병희와 류창하, 2015). 그래서 지반진동을 예측하기 위한 방법으로 실측 데이터를 바탕으로 통계학적 회귀분석을 통해 경험적 회귀모형이 사용되고 있으며(Duvall and Petkof, 1959; Langefors and Kihlstrom, 1963; Ghosh and Daemen, 1983; Kahriman, 2002; Rai and Singh, 2004; Mesec et al., 2010), 최근에는 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 수치해석적 방법이 사용되고 있다(Ainalis et al., 2017; Lu et al., 2011; Zhao et al., 2016; Wang et al., 2022).

본 연구에서는 실험적인 방법을 통해 경험적 회귀모형을 획득하고자 하였다. 실험은 자체 제작한 폭발 압력센서를 활용하여 단일공 발파를 수행하였으며, 단일공 발파를 통해 발파공과 관측공에서의 압력, 발파진동을 분석하였다. 실험결과를 토대로 제작한 폭발압력센서의 특성을 고찰하였으며, 거리에 대한 폭발압력 관계식을 도출하였다.

2. 현장 실험

2.1 현장개요

실험 대상지는 전남에 위치한 석회석 지하광산이며, 해당 현장은 북동쪽에서 남서쪽으로 치달리는 구조선 방향을 일정한 패턴으로 보이고 있으며, 이러한 구조는 산맥의 주방향에도 반영되고 있다. 특히 좁은 폭이지만 띠 모양으로 석회암층이 분포하고 있으며, 실험 대상지는 시생대층과 북서쪽으로는 고생대층으로 추정되는 옥천계의 편암류 층이 1 km 정도의 폭으로 띠를 이루면서 분포하고 있다(홍승호와 윤욱, 1986).

표 1에는 평균 기초물성 결과가 기재되어 있으며, 이에 포함된 역학적 물성은 정적하중 조건에서 수행된 일축압축시험, 압열인장시험, 및 삼축압축시험을 통해 얻어진 것이다.

실험 대상지에서는 폭약의 폭발반응에 의한 지반진동 전파특성을 파악하기 위하여 고위력 폭약 A, B, C를 사용하여 수직공 발파 3 회를 설계하였으며, 수직공 발파 모식도는 그림 1에 도시하였다. 고위력 폭약 A는 고폭속 폭약이며, 고위력 폭약 B는 반응열이 높은 폭약, 그리고 고위력 폭약 C는 RDX(hexogen) 계열의 폭약이다. 수직공 발파는 1 자유면을 가지는 단일공이며, 수공에 전색을 하지 않는 조건이다. 발파공은 천공경 120 mm, 천공장 9 m이며, 관측공은 천공경 76 mm, 천공장 9 m이다. 그리고 고위력 폭약 A, B, C는 특수 제작한 전용 용기에 5 kg을 장전하였으며, 전용 용기는 직경 100 mm, 높이 1 m 원기둥 형태이다. 계측항목은 발파공과 관측공에서의 압력, 그리고 발파진동이다. 발파공의 압력센서는 폭약의 바로 위에 위치하도록 8 m 깊이에 위치하며, 관측공의 압력센서는 3 m 깊이에 위치한다. 발파공과 관측공은 지표까지 물이 가득 채워진 상태이며, 발파공과 관측공에서는 폭약의 폭발반응에 의한 충격파 또는 응력파가 물을 통해 전달되어 측정된다. 그리고 발파진동 계측장비는 발파공을 기준으로 5 m에서 160 m 지점 사이를 계측하였다.

표 1. 실험 대상지 기초물성 결과

구분	밀도 (kg/m^3)	탄성파 속도 (m/s)	탄성 계수 (GPa)	포아송비	일축 압축강도 (MPa)	압열 인장강도 (MPa)	내부 마찰각 ($^{\circ}$)	점착력 (MPa)
측정치	2,700	6,200	41.6	0.21	110	7	41.7	20

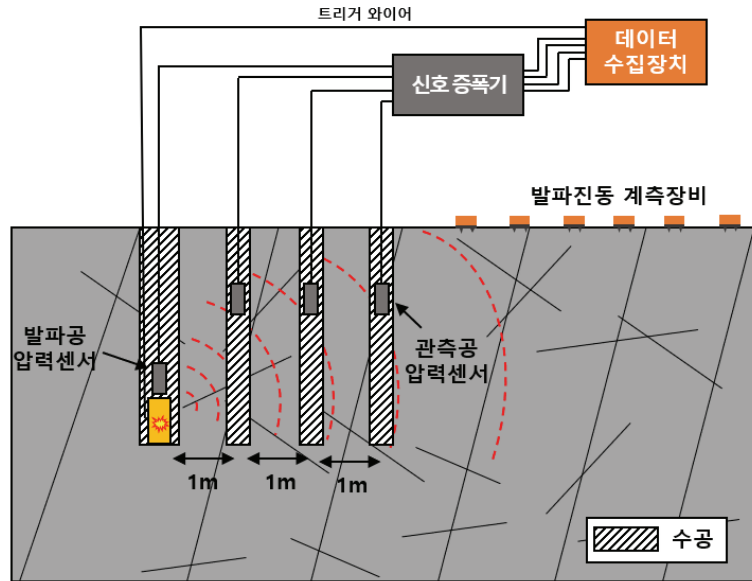


그림 1. 발파공 압력, 관측공 압력 및 지반진동 속도 계측 모식도.

2.2. 고위력 폭약 폭발압력 측정

발파공 및 관측공 내 폭발압력 개요

그림 2 는 폭약의 폭발반응에 의한 주변 암반 손상 및 발파공 내 작용하는 압력 이력곡선을 나타낸다. 폭약의 폭발반응에 의해 발생하는 효과는 주로 두 가지

로 나눌 수 있으며, 이는 동적효과와 정적효과이다. 동적효과는 그림 2에서 보여지는 압쇄영역에서 나타나며, 폭약의 폭굉 반응대에서 발생하는 충격파가 주변 암반을 압쇄하거나 파괴하는 효과를 의미한다 (Yamin, 2004). 정적효과는 그림 2에서 보여지는 균열 형성영역에서 나타나며, 폭약의 폭굉반응으로부터 발

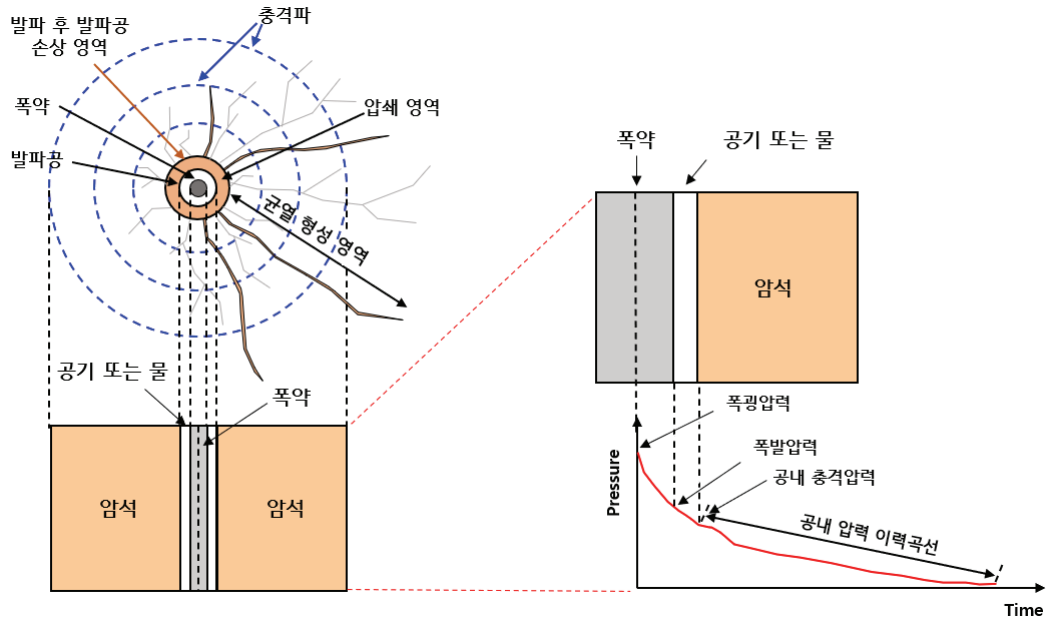


그림 2. 발파공 내 압력 이력곡선.

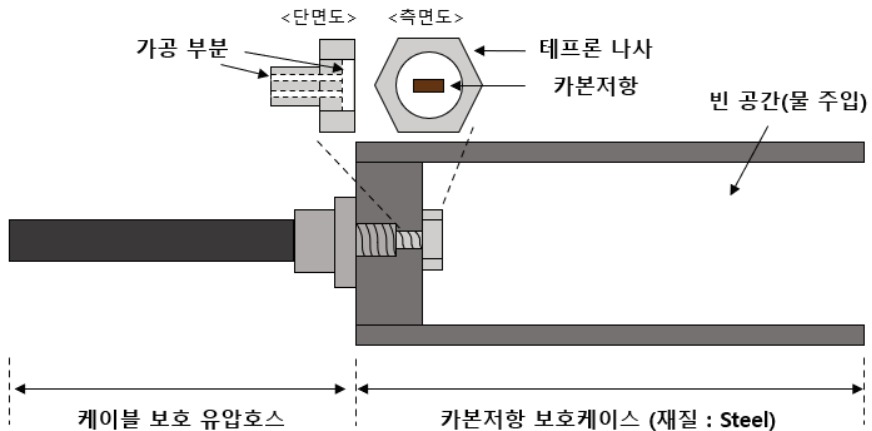
생한 생성가스가 팽창하여 암석 파쇄면이나 균열들에 침투하여 파괴하는 효과를 의미한다(Yamin, 2004). 이 때 발파공 내에서 작용하는 압력은 그림 2 와 같으며, 각각의 경계면에서는 폭굉압력, 폭발압력, 공내 충격 압력으로 정의된다(Cunningham, 2006; Nie, 1999). 폭 굉압력은 폭약의 중심부에서 작용하는 압력을 의미하며, 폭발압력은 폭약과 공기 또는 물과의 경계면에서 발생하는 압력을 의미한다. 공내 충격압력은 공기 또는 물과 암석의 경계면으로 즉, 발파공 벽에 작용하는 압력을 의미한다, 공내 충격압력 이후에는 공내 압력 이력곡선과 같이 압력이 점차 감소하게 된다.

폭발압력 측정방법

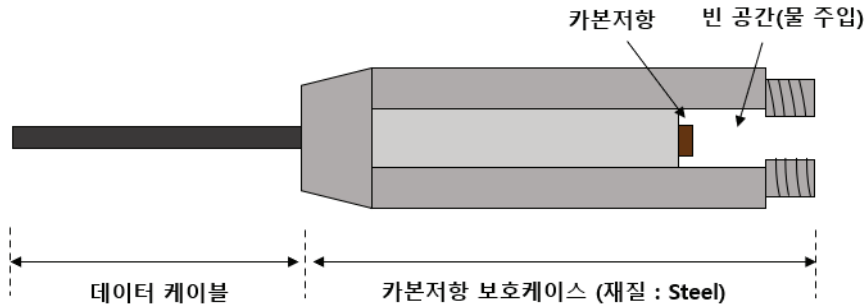
본 연구에서는 폭약의 폭발반응에 의해 발생하는 폭발압력 및 공내 충격압력을 측정하기 위하여 폭발 압력 측정 시스템을 구축하였으며, 폭발압력 측정 시스템은 카본저항(carbon resistor) 압력센서, 정션박스

(junction box) 그리고 데이터 기록 및 수집 장비로 구성된다.

일반적으로 발파공 내 작용하는 압력을 측정하기 위하여 PVDF(polyvinylidene fluoride)(Davies et al., 1997; Taylor et al., 2009)나 카본저항(Ginsberg and Asay, 1991; Rosenberg et al., 2007)을 활용하고 있다. 본 연구에서는 발파공 내 폭발압력 또는 공내 충격압 력을 측정하기 위하여 카본저항 압력센서를 제작하였으며, 제작한 폭발압력센서는 1/8W 470 Ω 저항을 사용하였다. 카본 저항은 취성도가 높아 충격이나 강한 압력에 의하여 쉽게 부서질 수 있어, 주변을 단단한 재질로 보호할 필요가 있다(김경규 외, 2021). 그림 3 은 제작한 압력센서 모식도를 나타낸다. 그림 3 (a) 는 발파공 압력센서(blast hole pressure, BHP)이며, 카 본저항 보호케이스, 카본저항, 테프론 나사, 케이블 보 호 유압호스로 구성된다. 카본저항 보호케이스는 철재 튜브(steel tube)형태로 한쪽 끝단이 뚫려 있으며, 물이



(a) 발파공 압력센서 - BHP 센서



(b) 관측공 압력센서

그림 3. 카본저항을 활용한 제작한 폭발압력센서 모식도.

채워질 수 있도록 하였다. 그리고 케이스의 다른 끝단에는 케이블 보호 유압호스와 테프론 나사가 결합될 수 있도록 가공되어 있으며, 테프론 나사는 카본저항 고정과 데이터 케이블 선이 연결될 수 있도록 가공되어 있다. 그림 3 (b) 는 관측공 압력센서이며, 카본저항 보호케이스, 카본저항, 데이터 케이블로 구성된다. 관측공 압력센서의 카본저항 보호케이스도 철재 튜브 형태이며, 한쪽 끝단이 뚫려 있어 물이 채워질 수 있도록 하였다. 케이스 내부는 카본저항이 고정될 수 있도록 설계되었다. 관측공 압력센서의 경우는 관측공 내부에서 폭발의 폭발반응에 의한 데이터 케이블의 단선 및 손상 등이 직접적으로 작용하지 않기 때문에 유압호스를 사용하지 않았다.

제작한 카본저항 압력센서의 신호를 증폭 및 출력하기 위하여 정선박스를 제작하였다(그림 4 (a)). 정선 박스는 제작한 압력센서의 신호를 증폭하는 장치로서 폭발압력에 의한 카본저항의 저항변화를 전압값으로 변환하는 장비이다. 정선박스는 저항변화에 따른 전압값의 출력비를 조절할 수 있도록 470 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ 3 종류의 내부저항을 가지고 있으며, 이때 초기출력전압은 2.5V, 1.6V, 0.22V 가 되도록 설정이 가능하다.

데이터 기록 및 수집 장비는 MREL 사의 Microtrap 장비를 활용하였다(그림 4 (b)). 이 장비의 특징은 1 개

의 폭발속도 측정 채널과 4 개의 데이터 기록 채널을 동시에 측정할 수 있으며, 샘플링 속도는 1 Hz에서 2 MHz 까지 가능하다. 그리고 트리거(trigger) 기능을 지원하며, 내부 트리거와 외부 트리거 기능을 지원한다. 특히 외부 트리거는 트리거 와이어(trigger wire)를 사용하며, 와이어 단선의 신호를 받아 데이터가 계속 되도록 하는 기능이다.

본 연구에서는 제작한 카본저항 압력센서를 활용하여 발파공과 관측공에서의 압력을 측정하였으며, 측정 시 정선박스는 내부저항 470 Ω, 초기출력전압 2.5 V 로 설정하였다. 그리고 Microtrap에는 발파공 압력센서 1 개와 관측공 압력센서 3 개로 총 4 개의 데이터 기록 채널을 활용하였으며, 외부 트리거 기능을 활용하였다.

폭발압력 측정 시스템을 통해 획득한 카본저항의 전압값을 폭발압력값으로 변환하기 위하여 Rosenberg (2007)이 제안한 보정식을 활용하였으며, 해당 보정식은 식 (1) 과 같다. 보정식은 Rosenberg(2007)가 Ginsberg 와 Asay(1991) 의 가스건과 수중실험 결과를 바탕으로 새롭게 제안한 식이다.

$$P(GPa) = \frac{\alpha(1 - R/R_0)}{R/R_0 + \beta} \tag{1}$$



(a) 카본저항 정선박스



(b) Microtrap

그림 4. 카본저항 압력센서 정선박스 및 데이터 기록 장치.

여기서, P 는 폭발압력(GPa)을 의미하며, R 은 카본저항의 측정저항(Ω), R_0 는 카본저항의 초기저항 (Ω)을 의미한다. α 와 β 는 상수를 의미하며, 그림 5 와 같이 카본저항에 따라 달라진다. 본 연구에서는 1/8 W 470 Ω 카본저항을 사용하였으며, α 는 0.3 과 β 는 0 의 값을 적용하였다.

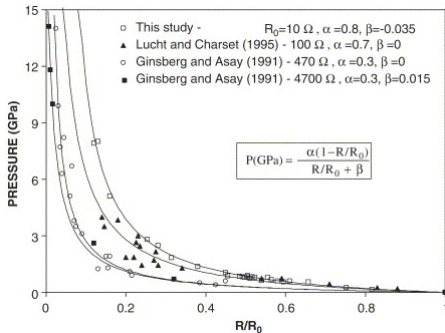


그림 5. 다양한 카본저항의 저항변화에 따른 압력 경험식(Rosenberg et al, 2007).

폭발압력 측정결과

실험은 폭약 5 kg을 수공에서 전색을 하지 않고 발파하였으며, 발파공 및 근접한 관측공에서의 폭발압력과 충격압력을 측정하였다. 그림 6 은 고위력 폭약 A, B, C 에 대한 발파공의 폭발압력 이력곡선을 도시하였으며, 그림 7 은 고위력 폭약 A 실험에 대한 관측공에서의 충격압력 이력곡선을 도시하였다. 발파공의 폭발압력 이력곡선을 살펴보면, 폭약이 기폭된 후 약 0.05 ms 지점까지 압력이 급격하게 상승한다. 최대압력값에 도달한 이후에는 압력이 감소하는 경향을 보이며, 0.7 ms 도달 전에 카본저항이 손상되어 압력이 0 으로 떨어지는 것을 확인하였다. 고위력 폭약 B의 경우는 0.15ms 이후에 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 폭약의 폭발반응에 의해 카본저항의 손상 또는 데이터 케이블의 단선에 의해 발생한 것으로 판단된다. 반면에 관측공의 충격압력 이력곡선은 긴 시간동안 압력이 작용하여 최대압력값에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 표 2 에 기재된 결과를 살펴보면, 발파공의 폭발압력은 184 MPa ~ 280 MPa 를 나타내었다. 관측공의 충격압력을 폭약의 종류와 상관없이 살펴보면, 1 m 지점에서 0.369 MPa 과 2.625 MPa, 2 m

지점에서 0.542 MPa ~ 6.702 MPa, 3 m 지점에서 0.416 MPa ~ 0.653 MPa 를 나타내었다. 고위력 폭약 B의 경우는 1 m 지점보다 2 m 지점과 3m지점에서 높은 압력이 측정되었다. 이는 폭원과 관측공 센서와의 사거리로 살펴보았을 때, 발파공과 1 m 지점의 관측공 센서와의 사이에 절리 또는 지하수 등에 의해 나타난 결과로 판단된다. 고위력 폭약 B의 2 m 지점과 3 m 지점을 살펴보면, 거리가 증가함에 따라 압력이 감소하는 것으로 나타낸다. 고위력 폭약 C의 1m 지점은 토사로 인하여 관측공이 막혀 불가피하게 1 m 지점은 제외하고 2 m과 3 m 지점을 측정하였다. 폭약별 2m 지점과 3 m 지점의 충격압을 살펴보면, A는 43 % , B는 78 % C는 6 % 감소 수준으로 평가되었다. 관측공의 충격압력은 암반을 통해 전파되어 측정되는 압력이며, 이는 암반의 불연속면 특성에 의해 발생하는 차이로 판단된다.

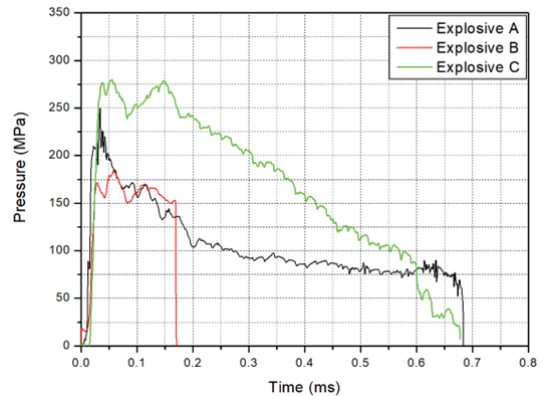


그림 6. 발파공 폭발압력-시간 이력곡선.

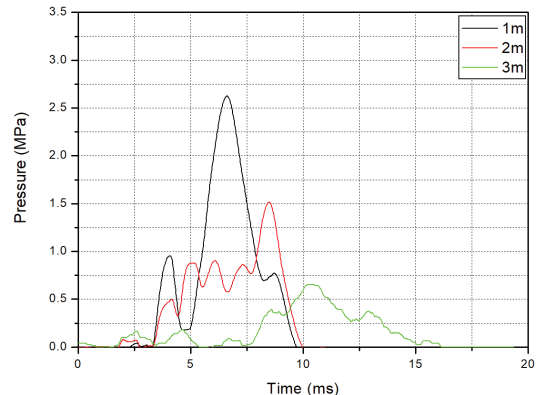


그림 7. 관측공 충격압력-시간 이력곡선 (고위력 폭약 A).

표 2. 발파공 및 관측공 압력측정 결과

발파공 폭발압력	관측공 충격압력			
	BHP (MPa)	1m 지점 (MPa)	2m 지점 (MPa)	3m 지점 (MPa)
고위력 폭약 A	250	2.625	1.516	0.653
고위력 폭약 B	184	0.369	0.542	0.427
고위력 폭약 C	280	-	6.702	0.416

2.3 고위력 폭약 지반진동 측정

지반진동 개요

발파진동에 영향을 주는 변수는 화약의 종류, 장약량, 폭원과의 이격거리, 암반의 역학적 특성 및 암반 상태, 기폭시차, 최소저항선과 천공간격, 자유면의 상태 등이 있다. 즉, 발파진동은 입지조건과 발파조건에 따라 달라지며, 이는 각각의 현장마다 발파조건에 따른 실측을 통해 발파진동 전파 특성을 파악하는 것이 중요하다. 하지만, 많은 변수들을 모두 고려하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 발파진동 실측자료를 통계적인 방법으로 회귀분석하는 방법이 사용되고 있으며, 많은 연구자들에 의해 다양한 경험적 회귀모형으로 제안되었다. 대표적으로 발파진동을 예측하는 회귀모형은 자승근 환산거리(square root scaled distance)와 삼승근 환산거리(cube root scaled distance) 이다. 환산거리(scaled distance, SD)는 장약량과 계측위치부터 폭원까지의 거리와의 관계이다. 자승근 환산거리를 이용한 발파진동예측식은 긴 봉상장약(cylindrical charge)을 고려한 개념이며, 삼승근 환산거리를 이용한 발파진동예측식은 구상장약(spherically charge)을 고려한 것이다.

지반진동 계측방법

본 연구에서는 폭약의 폭발반응에 의해 발생하는 발파진동을 측정하기 위하여 블라스트메이트(blastmate), SV-1 그리고 enDAQ 장치를 사용하였으며, enDAQ 장비의 제원은 표 3에 기재하였으며, 그림 8은 enDAQ 장치를 도시하였다. 블라스트메이트와 SV-1은 3축 진동센서를 이용하여 진행방향(longitudinal), 접선방향(transverse), 수직방향(vertical)을 동시에 측정할 수 있으며, 샘플링 주파수(sampling frequency)는 1,024 Hz, 진동측정범위는 0.0156 mm/s에서 254 mm/s까지 가능하다. enDAQ 장치는 3축 가속도-시간 이력, 폭풍압, 온도, 습도 등을 동시에 계측할 수 있으며, 샘플링 주파수는 4,000 Hz, 측정범위는 -40 g에서 40 g까지 측정이 가능하다. enDAQ 장치는 계측 시 별도의 고정 지지대를 제작하여 사용하였으며, 고정 지지대를 결합한 모습은 그림 8(b)에 도시하였다. 민경조 외(2023)는 enDAQ 장치와 블라스트메이트의 진동 성분값을 비교하고 측정값의 변화율을 산정하였으며, 변화율은 약 7.58%로 평가하였다.

본 연구에서는 발파공을 기준으로 5 m에서 160 m 지점 사이를 측정하였으며, 특히 발파공과 가까운 5 m에서 40 m 근거리 지점은 enDAQ 장치를 사용하여 측정하였다.

표 3. 발파공 주변 가속도 측정 장치 세부제원

계측 항목	가속도, 폭풍압, 온도, 습도
분해능	0.0008 g
내충격 한계	3000 g
가속도 측정 범위	40 g ~ 40 g
샘플링 속도	4,000 Hz
측정방향 성분	진행(L), 접선(T), 수직(V)



(a) enDAQ



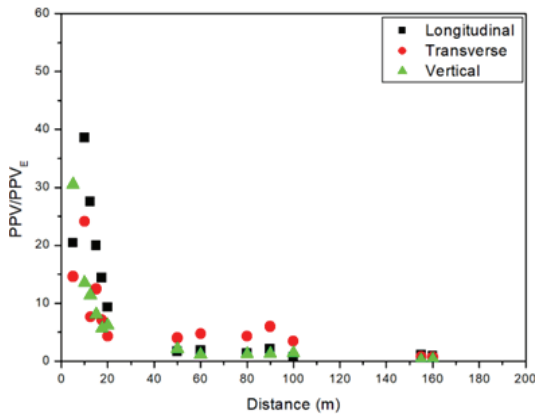
(b) 고정 지지대 결합한 enDAQ

그림 8. 발파공 주변 근접 가속도 측정 장치.

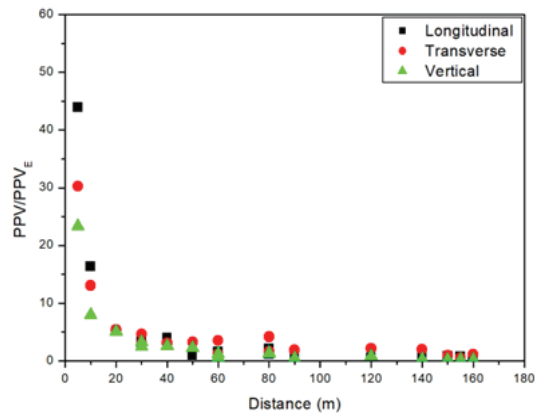
지반진동 계측결과

수직공 발파 실험결과를 비교하기 위하여 에멀전(emulsion)을 기준폭약으로 사용하였다. 고위력 폭약 A, B, C 와 동일한 현장과 동일한 조건으로 에멀전 5 kg 발파를 수행하였으며, 50m 지점에서 발파진동을 계측하였다. 이때 최대입자속도(peak particle velocity, PPV)는 진행방향(L) 0.332 cm/s, 접선방향(T) 0.168

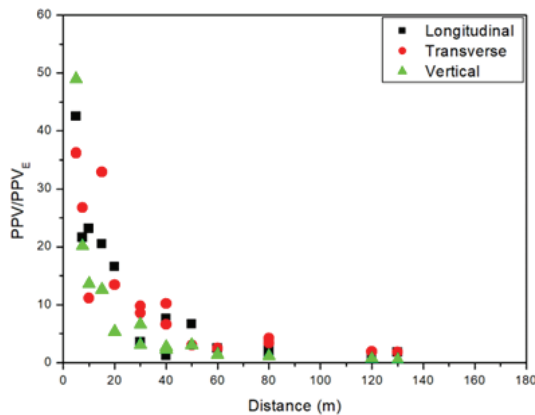
cm/s, 수직방향(V) 0.725 cm/s 이며, 최대벡터합(peak vector sum, PVS)은 0.778 cm/s 이다. 그림 9 는 에멀전 폭약의 성분별 최대입자속도(PPV_E)와 최대벡터합(PVS_E) 값을 기준으로 고위력 폭약 A, B, C의 발파진동 결과를 그래프로 나타낸 것이며, 그림 9 의 y 축은 무차원 계수이다. 고위력 폭약 A 는 20 m 지점



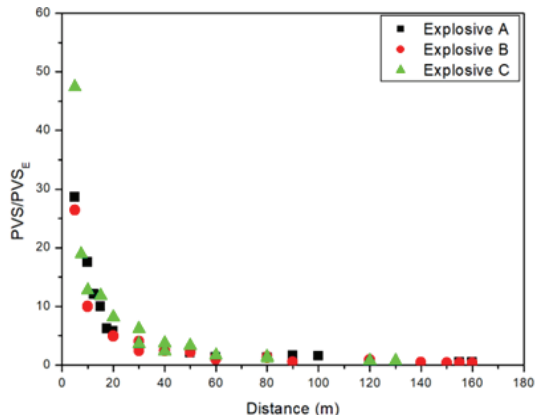
(a) 고위력 폭약 A



(b) 고위력 폭약 B



(c) 고위력 폭약 C



(d) 폭약별 PVS

그림 9. 고위력 폭약의 상대 지반진동속도-거리 감쇠특성 비교.

이내에서는 진행방향 성분이 우세한 것으로 나타났으며, 20 m 이후에서는 접선방향 성분이 우세한 것으로 나타내었다. 고위력 폭약 B 는 대체로 진행, 접선, 수직방향 성분이 유사하며, 발파공에서부터 10 m 지점까지는 진행방향 성분이 우세한 것으로 나타내었다. 고위력 폭약 C 는 대체로 접선방향 성분이 우세하며, 5 m 지점에서는 수직방향 성분이 우세한 것으로 나타내었다. 모든 실험에서 경향성을 확인해보면 거리가 멀어짐에 따라 발파진동이 감소하는 경향을 나타내었으며, 성분에 상관없이 최대 PPV 비율을 살펴보면 고위력 폭약 A는 38.5, 고위력 폭약 B는 43.9, 고위력 폭약 C는 48.9를 나타내었다.

3. 토론 및 고찰

3.1 폭발압력센서 특성 분석

그림 10은 일반적으로 카본저항을 고정 및 보호하는 재질로 사용되는 에폭시를 활용한 기존 카본 센서 (Rosenverg et al., 2007)와 표 2 의 BHP 센서의 결과를 그래프로 나타낸 것이며, 표 4 는 기존 카본 센서와 BHP 센서가 압력을 계측한 지속시간(duration)을 기재하였다.

센서의 반응성 측면에서 접근해보면, 모든 실험에서 가장 높은 압력이 측정된 기존 카본 센서가 높은 반응성을 보이는 것으로 평가되었다. 센서의 민감도를 비교하기 위해 실험별 측정된 압력 차이를 비교하였다. 기존 카본 센서는 20 MPa, BHP 센서는 96 MPa 를 나타내었으며, 이는 BHP 센서가 높은 민감도를 가지고 있는 것을 의미한다. 마지막으로 압력이 작용하는 지속시간을 비교해보면, BHP 센서는 약 0.7 ms 동안의 지속시간을 가지며, 기존 카본 센서는 약 0.05 ms 동안의 지속시간을 가지는 것을 평가되었다.

종합해보면 BHP 센서는 높은 민감도를 가지며, 긴 지속시간동안 압력 측정이 가능하며, 이는 발파공의

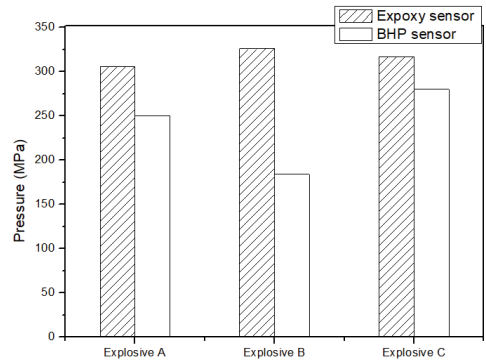


그림 10. 기존 카본 센서와 BHP 센서의 폭발압력 측정결과 비교.

폭발압력을 측정하기에 적합한 센서로 판단된다. 단, 본 연구에서는 폭약 물성에 대한 제한된 정보로 인하여 이론적인 폭발압력과 측정된 폭발압력과의 상관관계 고찰이 부족하며, 이는 향후 산업용 폭약을 이용한 연구를 통해 이루어져야 할 것으로 판단한다.

3.2 폭발압력 전파특성 분석

본 연구에서는 폭약의 폭발반응에 의해 발생한 압력 전파특성을 분석하기 위하여 발파공과 관측공에서 폭발압력과 충격압력을 측정하였으며, 거리에 대한 폭발압력 관계식을 도출하고자 한다. 그림 11 은 표 2 의 실험결과를 그래프로 나타낸 것이며, 거리에 대한 폭발압력 고찰하기 위하여 추세를 도시한 것이다. 거리와 폭발압력의 관계는 식 (2) 에서 식 (4) 와 같이 평가되었으며, P 는 폭발압력을 의미하며, D 는 폭원으로부터 이격거리를 의미한다. 이때 폭약의 중간 지점을 폭원이라고 하였을 때, 폭원의 깊이는 8.5 m 이며, 관측공 센서는 3 m 깊이에 위치한다. 폭원과 관측공 센서와의 깊이 차는 5.5 m 이며, 발파공과 관측공의 간격인 1 m, 2 m, 3 m의 사거리를 계산하면, 5.59m, 5.85m, 6.26m 이다.

표 4. 기존 카본 센서와 BHP 센서의 압력 지속시간

기존 카본센서 압력 지속시간(ms)		BHP 센서 압력 지속시간(ms)
고위력 폭약 A	0.044	0.681
고위력 폭약 B	0.071	0.169
고위력 폭약 C	0.014	0.678

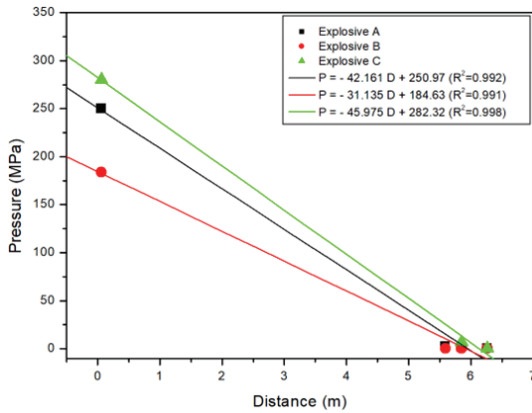


그림 11. 장약공 내 폭발압력과 관측공 내 충격압력의 거리에 따른 변화.

$$P = -42.161 D + 250.97 \quad (2)$$

$$P = -31.135 D + 184.63 \quad (3)$$

$$P = -45.975 D + 282.32 \quad (4)$$

거리와 폭발압력의 관계식을 비교해보면, 기울기 값은 42.161, 31.135, 45.975 로 평가되며, 상수는 250.97, 184.63, 282.32 로 평가되었다. 고위력 폭약 B 를 기준으로 비교해보면, 고위력 폭약 A 의 기울기는 1.34 배, 고위력 폭약 C 는 1.48 배로 평가되었으며, 고위력 폭약 A 의 상수는 1.36배, 고위력 폭약 C 는 1.53 배로 평가되었다.

3.3 지반진동 전파특성 분석

지반진동 전파특성을 분석하기 위하여 그림 12 는 그림 9 의 실험결과를 로그-로그 스케일로 나타낸 것이며, 상대 지반진동속도와 거리와 관계를 고찰하기 위하여 추세선을 도시하였다. 고위력 폭약의 상대 지반진동 속도와 거리와의 관계는 식 (5) 에서 식 (7) 과 같이 평가되었다.

$$RPVS = 219.9 D^{-1.183} \quad (5)$$

$$RPVS = 198.1 D^{-1.228} \quad (6)$$

$$RPVS = 284.7 D^{-1.229} \quad (7)$$

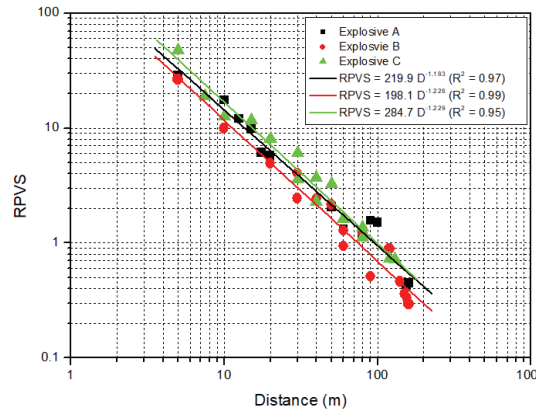


그림 12. 고위력 폭약의 상대 지반진동속도의 거리에 따른 변화.

식 (5) 에서 식 (7) 의 $RPVS$ 는 상대 지반진동속도를 의미하며, D 는 발파공으로부터 이격거리를 의미한다. 관계식은 $RPVS = aD^{-b}$ 이며, a 는 폭약의 위력을 의미하며, b 는 지반의 감쇠지수를 의미한다. a 는 219.9, 198.1, 284.7 로 평가되었으며, b 값은 1.183, 1.228, 1.229로 평가되었다. 고위력 폭약 B 를 기준으로 비교해보면, 고위력 폭약 A 의 K 는 1.11 배, 고위력 폭약 C 는 1.44 배로 평가되었으며, 고위력 폭약 A 의 n 은 0.96 배, 고위력 폭약 C 는 1.001 배로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 1 자유면을 가지는 단일공에 전색을 하지 않고 수공인 조건에서 고위력 폭약 A, B, C에 대한 수직공 발파를 통해 지반진동 전파특성에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 발파진동을 예멸전 폭약을 기준으로 무차원 계수로 비교해보면, 고위력 폭약 A 는 38.5, 고위력 폭약 B 는 43.9, 고위력 폭약 C 는 48.9 를 나타내었다.
- 2) BHP 센서가 카본센서 대비 4.8배 높은 민감도와 최대 48배 만큼 더 긴 지속시간동안 측정이 가능하므로 발파공 폭발압력을 측정하기에 적합한 것으로 평가되었다.
- 3) 고위력 폭약 B 를 기준으로 위력을 비교해보면, 고위력 폭약 A는 1.36배, 고위력 폭약 C는 1.53배로

평가되었다. 감쇠기율이 또한 동일하게 비교해보면, 고위력 폭약 A는 1.34배, 고위력 폭약 C는 1.48배로 평가되었다.

- 4) 고위력 폭약 B를 기준으로 지반진동속도 전파특성을 비교해보면, 고위력 폭약 A가 1.11배, 고위력 폭약 C는 1.44배로 높은 진동치를 발생하는 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UE201046GD).

참고문헌

- 김경규, 민경조, 신찬휘, 김한림, 양주석, 윤경재, 김정규, 조상호, 2021, 카본저항을 활용한 중·고속 충격압력 측정 시스템 개발, 한국군사기술학회 종합학술대회
- 민경조, 김영근, 신찬휘, 조상호, 2023, 파라핀 지판 구조체를 활용한 Air-Deck 발파공법의 지반진동 저감특성에 관한 연구, 화약발파, Vol. 41, No. 1, pp. 32-45.
- 박승훈, 권상기, 이창수, 이재원, 윤석, 김건영, 2020, 고심도 암반의 스프링 평가에 대한 사례 분석 및 광주 스프링 모델링. 터널과 지하공간, Vol. 30, No. 2, pp. 109-135.
- 최병희, 류창하, 2015, 발파진동 및 발파소음의 측정 및 자료처리. 화약발파, Vol. 33, No. 3, pp. 29-50.
- 홍승호, 윤욱, 1986, 수치지질도_5만축척_송정, 한국동력자원연구소.
- Ainalis, D., Kaufmann, O., Tshibangu, J. P., Verlinden, O., Kouroussis, G., 2017, Modelling the source of blasting for the numerical simulation of blast-induced ground vibrations: a review, Rock mechanics and rock engineering, Vol. 50, pp. 171-193.
- Cunningham, C., 2006, Concepts of blast hole pressure applied to blast design, Fragblast, Vol. 10, No. 1-2, pp. 33-45.
- Davies, F. W., Smith, E., Delacruz, C., 1997, The measurement of detonation waves in composite explosives, In Proceedings of the annual symposium on explosives and blasting research, pp. 145-160.
- Duvall, W. I., Petkof, B., 1959, Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock, USBMRI 5483, pp.1-20.
- Ghosh, A., Daemen, J. J., 1983, A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws), 24th US Symp. on Rock Mech., Texas, pp.151-157.
- Ginsberg, M. J., Asay, B. W., 1991, Commercial carbon composition resistors as dynamic stress gauges in difficult environments, Review of scientific instruments, Vol. 62, No. 9, pp.2218-2227.
- Kahriman, A., 2002, Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at can open-pit lignite mine in Turkey, Environmental Geology, Vol. 41, pp.653-661.
- Langefors, U., Kihlström, B., 1963, The modern technique of rock blasting, 3rd. ed., John Wiley & Son Inc., New York, pp.285-288.
- Lu, W., Yang, J., Chen, M., Zhou, C., 2011, An equivalent method for blasting vibration simulation, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No. 9, pp.2050-2062.
- Nie, S., 1999, Borehole Pressure in Blast Holes: Measurements in Granite Blocks Versus Estimations.
- Mesec, J., Kovač, I., Soldo, B., 2010, Estimation of particle velocity based on blast event measurements at different rock units, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, No. 10, pp.1004-1009.
- Rai, R., Singh, T. N., 2004, A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors, Indian journal of engineering & materials sciences, Vol. 11, No. 3, pp.178-184.
- Rosenberg, Z., Ginzburg, A., Ashuach, Y., 2007, More on commercial carbon resistors as low pressure gauges, International journal of impact engineering, Vol. 34, No. 4, pp.732-742.
- Taylor, N. E., Braithwaite, C. H., Morley, M. J., Chapman, D. J., Proud, W. G., 2009, Explosive-Rock Interactions; Experimental Study, In AIP Conference Proceedings, Vol. 1195, No. 1, pp.1139-1142.
- Wang, X., Li, J., Zhao, X., Liang, Y., 2022, Propagation characteristics and prediction of blast-induced vibration on closely spaced rock tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 123, 104416.
- Yamin, G. A., 2005, Field measurements of blast induced damage in rock, Ph. D Thesis, University of Toronto, Canada
- Zhao, H. B., Long, Y., Li, X. H., Lu, L., 2016, Experimental and numerical investigation of the effect of blast-induced vibration from adjacent tunnel on existing tunnel, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 20, No. 1, pp.431-439.



김 경 규
전북대학교 공과대학
에너지저장·변환공학대학원 박사과정

Tel : 063-270-4636
E-mail : akrn823@jbnu.ac.kr



신 찬 휘
전북대학교 공과대학
에너지저장·변환공학대학원 석사과정

Tel : 063-270-4636
E-mail : jg030120@jbnu.ac.kr



김 한 림
전북대학교 공과대학
토목/환경/자원·에너지공학부 대학원
석사과정

Tel :
E-mail : jg030120@jbnu.ac.kr



양 주 석
국방과학연구소 선임연구원

Tel : 042-821-4886
E-mail : july13@add.re.kr



배 상 호
국방과학연구소 선임연구원

Tel : 042-821-0933
E-mail : loih037@add.re.kr



윤 경 재
국방과학연구소 책임연구원

Tel : 042-821-2893
E-mail : kjyun@add.re.kr



조 상 호
전북대학교 공과대학
토목/환경/자원·에너지공학부 교수

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