

Split tube를 이용한 균열 제어발파 현장 실험

Experimental Study of Fracture Control Blasting Using the Split Tube

백 승규¹⁾ 류 창하²⁾ 선우 춘²⁾ 최 병희²⁾ 김 재동¹⁾

Seung-Kyu Baek, Chang-Ha Ryu, Choon Sunwoo,

Byung-Hee Choi and Jae-Dong Kim

¹⁾강원대학교, ²⁾한국지질자원연구원

초 록

발파시 공벽 주변에서 방사상으로 발생하는 무수한 균열들을 제어하고 일정한 방향으로 절단면을 형성하기 위해서 split tube를 이용한 발파 방법에 대한 현장 실험을 실시하였다.

현장 실험결과 절단면을 발달시키고자 하는 방향으로 제어할 수 있었다. 계산에 의한 발파 압력과 제어된 균열면의 길이를 비교하였다.

현장 벤치 벽면에서 에멀전 계열 폭약의 발파 압력이 700MPa 이상일 경우 균열을 원하는 방향으로 제어할 수 있었을 뿐만 아니라, 공경의 30배까지 균열이 전파되었다.

핵심어 : 균열제어, 방향제어, split tube

1. 서 론

일반적으로 터널 굴착, 지하 공간 및 암반의 사면등과 같은 대규모 발파의 경우 설계와 다른 원하지 않는 발파 결과가 되거나, 여굴이 발생하는 문제점들의 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제어 발파에 대한 관심이 높아져 여러 연구들이 진행되었다. 벽면을 매끄럽게 형성하며 손상의 범위를 크게 줄일 수 있는 발파 방법으로 smooth blasting, pre-splitting, line drilling등과 같은 제어 발파방법이 제안되어 사용되고 있다.

또한 최근 연구되고 있는 절단 방향을 조절

하기 위한 제어발파 방법으로는 발파공 내에 균열면을 제어하고자하는 방향으로 노치를 가공하는 방법¹⁾과 발파공 주변에 균열을 제어하고자하는 방향으로 위성공을 천공하는 방법²⁾, 균열면을 제어하고자하는 방향으로 폭약의 형태를 변형시키는 방법과 split tube를 이용하여 폭약의 폭굉압을 집중시키는 방법들이 알려지고 있다.³⁾

본 연구는 균열 발생의 방향을 제어하기 위하여 split tube를 이용한 방법으로 현장 실험을 실시하였다.

2. 실험 방법 및 현장실험

본 연구에서는 split tube를 이용한 발파 방법으로 현장에서 균열면의 초기 생성 위치와 성장 방향 제어에 대하여 연구 하였다. Split tube를 이용한 균열면제어에 대한 연구는 시멘트 모르타르를 이용한 소규모 실험실 연구⁴⁾들은 있었으나, 현장 적용실험의 경우는 거의 없었으며, 실험실 실험결과들을 실제 현장에 적용하기는 매우 어려우므로 현장 조건에 적용 가능한 조건들을 알아보기 위하여 현장 실험을 실시하였다.

Split tube를 이용한 균열면 제어발파의 현장 실험은 전라북도 남원시에 소재한 (주)00산업의 골재 생산 발파 현장에서 실시되었다. 이 채석장을 구성하고 있는 암반은 주라기의 남원 화강암으로 불리우는 화강암이 분포하고 있다.

실험 순서는 현장에서 실험 대상 암반 및 암괴 선정 - 천공 및 장약 계획 - 천공 - split tube 조립 - 장약 및 전색 - 발파 - 파괴면 및 균열 제어면 관찰의 순서로 이루어졌다.

실험은 일반 발파공 실험과 split tube 균열면 제어발파로 구분하여 실시하였다. 일반 원형공 발파에서는 발파시 발생하는 균열 거동 양상 및 적정 장약량을 구하기 위한 실험을 실시하였으며, split tube를 이용한 균열면 제어발파 실험에서는 절단면의 제어 정도를 실험하였다.

① 실험 대상 암반 및 암괴 선정

현장에서 암괴의 3축 방향 크기가 각각 2m 이상인 암괴를 실험 대상으로 선정하였으며, 암반의 경우 벤치 높이 10m 이상인 벤치 벽면에 천공 위치를 선정하여 실험 하였다. 본 실험의 연구 대상 암석인 남원 화강암의 일축압축 강도는 140 MPa정도로 경암에 속하며, 인장강도는 8.3 MPa이고 기타 물성은 표 1과 같다.

표 1. 남원 화강석의 물성.

| 물 성 | 평균값 |
|--------|------------------------|
| 탄성계수 | 56.7 GPa |
| 프와송비 | 0.26 |
| 인장강도 | 8.3 MPa |
| 일축압축강도 | 140.2 MPa |
| 밀도 | 26.7 kN/m ³ |

② 천공

실험 대상으로 선정된 암괴에 crawler drill을 이용하여 공경 75mm와 42mm의 발파공을 천공하였다. 발파공 벽면에 작용하는 폭발 압력의 크기를 조절하는 방법은 폭약량을 조절하는 방법과 약경을 조절하는 방법, 공경을 조절하는 방법이 있다. 동일한 폭약을 사용하여 공 벽면에 작용하는 발파 압력의 크기를 다르게 하기 위하여 2종류의 공경에 대해 실험하였다.

사진 1의 (a)는 crawler drill에 장착하여 천공한 직경 75mm button bit를 나타낸 것이고, (b)는 천공된 공의 모습을 나타낸 것이다.



사진 1. (a) 75mm button bit (b) 천공 후 모습

③ 장약 및 split tube 조립

실험에 사용된 폭약의 종류는 암괴의 크기 또는 암반의 상태에 따라 예멀전 계열의 폭약과 정밀 폭약을 혼용하였으며, 전기 뇌관으로 기폭 하였다. 표 2는 실험에 사용한 폭약의 제원이다. 전색제의 영향을 알아보기 위하여 전색제를 사용하였을 경우와 무전색 발파를 하였을 경우에 대하여 실험하였다.

표 2. 실험에 사용된 폭약의 특성.

| 종 류 | 무 계 (g) | 규 격 (mm) | | 폭 속 (m/sec) | 비 중 | 비 고 (포장형태) |
|-------|---------|----------|-----|-------------|-----------|------------|
| | | 구경 | 길이 | | | |
| 에멀전계열 | 200 | φ20 | 200 | 5,900 | 1.20-1.25 | 기름종이 |
| | 1,000 | φ50 | 500 | 5,900 | 1.20-1.25 | 필름 |
| 정밀폭약 | 125 | φ17 | 500 | 4,200 | 1.15-1.25 | 플라스틱 |

Split tube의 제작에 사용된 관의 재질은 종이와 PVC이며, 관의 길이는 1m이다. 천공 작업시 bit의 마모가 발생하기 때문에 75mm와 42mm로 천공을 하여도 실제 천공되는 공경은 63mm와 40mm로 천공되므로 공내에 관을 원활하게 삽입하기 위하여 직경 60mm와 39mm 관을 사용하였다. 관의 길이 방향으로 두 쪽으로 절단하여 절단된 관 내부에 폭약을 고정시킨 후 실험 하였다. 사진 2는 실험에 사용된 split tube들을 나타낸 것으로 관의 길이 방향으로 절단한 모습이다. 절단된 한쪽 관 내부에 폭약을 테이프로 고정 한 후 나머지 한쪽 관을 서로 결합하여 발파공 내에 삽입할 수 있도록 하였다. 균열면 제어 발파에서 split tube의 재질에 따른 영향을 알아보기 위하여 PVC tube와 종이 tube를 사용하여 실험하였다.



사진 2. (a) split tubes (b) 폭약을 tube 내에 고정 한 모습

일반 발파공 실험 결과로부터 암괴의 크기, 공경, 공 깊이 등을 고려하여 적정 장약량을 산정하였으며, 폭력이 split tube의 한곳에만 집중적으로 작용하는 것을 방지하기 위하여

관내에서 분산 장약을 하였다. 정밀 폭약을 주 장약으로 사용할 경우 기폭약으로 에멀전계 폭약을 사용하였고, 발파공 전색에는 현장의 석분을 사용하였다. 사진3은 폭약이 고정된 split tube를 공내에 삽입하여 장전한 모습과 전색제를 다지는 모습을 나타낸 것이다.

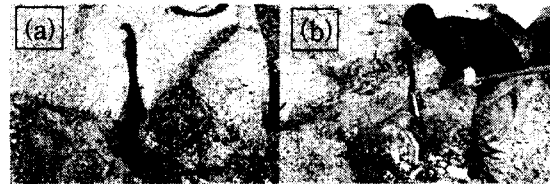


사진 3. (a) 발파공 내에 장전된 split tube (b) 전색제 다짐

④ 발파 및 관찰

실험은 적정 장약량을 구하기 위한 일반 발파공 발파 3회와 split tube를 이용한 균열 제어발파 9회가 실시되었다.

발파 후 균열의 발달 방향 및 균열 개수, 균열 전파 길이를 확인하였으며, 사진 4는 발파 후 공의 상하 방향으로 split tube의 slit을 따라 제어된 균열면의 모습을 나타낸 것이다.



사진 4. 발파 후 split tube의 slit을 따라 제어된 균열면

3. 결과 및 고찰

현장 실험 조건 및 결과는 표 3과 같다. 먼저 원형 발파공 실험에서 공발되지 않고 파단면이 형성 될 수 있는 적정 장약량을 구하였으며, 적정 장약량을 참고로 균열제어 발파에 필요한 장약량을 결정하였다.

일반적으로 전색제의 종류와 전색 길이에 따라 발파 결과에 크게 영향을 주고 있다고 알려져 있으며³⁾, 실험 결과 전색을 하지 않았을 경우 공발하거나, 공 주변에 파단면을 형성하기 위해서는 매우 큰 장약량을 필요로 하였으며, split tube 발파에서도 전색을 하지 않았을 경우 모두 공발하는 결과를 보였다.

Split tube는 폭굉시 발생하는 응력파를 slit 부분에 집중시켜 균열의 위치를 slit 부분에서 발생시키는 작용을 한다고 알려져 있으며⁴⁾, 현장 실험 결과에서도 slit이 가공된 부분에서 균열이 개시하고 전파되는 것을 확인 할 수 있었다.

암괴를 이용한 실험에서 slit의 위치에서 균열이 시작되어 전파하고자 하는 방향으로 진행하다가 자유면 방향으로 파단면이 형성되었다. 균열 전파 방향은 slit의 위치에서 계획된 방향으로 제어 되었지만 자유면의 영향으로 전파 길이는 정확하게 확인하기 어려웠다.

암반내 균열제어 실험에서는 균열의 방향뿐만 아니라 전파 정도를 확인할 수 있었다.

표 3. 발파 실험 조건 및 결과

| 번호 | 공경 (mm) | 공깊이 (cm) | 장약량 (g) | 전색제 | 결과 | 비고 |
|----|---------|----------|---------------------|-----|-------------|-----------------|
| 1 | 63 | 150 | 에멀션 200 정밀폭약 125 | 무전색 | 공 발 | |
| 2 | 63 | 150 | 에멀션 300 | 무전색 | 파 괴 | |
| 3 | 63 | 250 | 에멀션 500 | 석분 | 파 괴 | |
| 4 | 63 | 150 | 에멀션 100 정밀폭약 125 | 무전색 | 공 발 | 종이tube |
| 5 | 63 | 150 | 에멀션 200 정밀폭약 250 | 무전색 | 공 발 | 종이tube |
| 6 | 63 | 150 | 에멀션 260 | 무전색 | 공 발 | 종이tube |
| 7 | 63 | 150 | 에멀션 300 | 석분 | 균열 제어 30cm | 종이tube |
| 8 | 63 | 150 | 에멀션 300 | 석분 | 균열 제어 10cm | 종이tube |
| 9 | 63 | 250 | 에멀션 500 정밀폭약 375 | 석분 | 균열 제어 30cm | 종이tube |
| 10 | 63 | 250 | 에멀션 500 정밀폭약 375 | 석분 | 균열 제어 40cm | 종이tube |
| 11 | 40 | 180 | 에멀션 450 | 석분 | 균열 제어 40cm | 종이tube |
| 12 | 40 | 150 | 에멀션 400 | 석분 | 균열 제어 120cm | PVC tube, 벤치 벽면 |

발파시 발생하는 폭굉압은 매질을 파괴하는 데 가장 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 폭약의 종류와 공경에 따라 공 벽면에 작용하는 압력의 크기를 나타낼 수 있는 발파 압력 계산식을 이용하여 발파 압력을 계산하였고, 균열 제어량과 비교하였다.

폭굉 압력을 계산하기 위하여 식(1), (2) (U. S. A National Highway Institute, 1991)를 사용하였다.^{3), 5)}

$$P_D = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SGe \times V_e^2}{1 + 0.8 SGe} \quad (1)$$

$$P_B = P_D \times \left(\frac{d_c}{d_h} \right) \quad (2)$$

여기서,

P_D = 폭발압력 (kbar)

SGe = 폭약의 비중

V_e = 폭속 (ft/sec)

P_B = 디커플링 발파압력 (kbar)

d_c = 약경

d_h = 공경

그림 1은 split tube를 이용한 균열제어 발파에서 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 발파 압력과 현장 실험 결과 제어된 균열 길이를 나타낸 것

이다. 그림 1(a)은 발파공 내에 작용하는 발파 압력을 계산하여 발파 압력과 균열면 제어 길이의 관계를 나타낸 것이고, 그림1(b)은 공경과 제어된 균열면의 비인 균열 길이비를 계산하여 발파 압력과 균열길이 비의 관계를 나타낸 것이다.

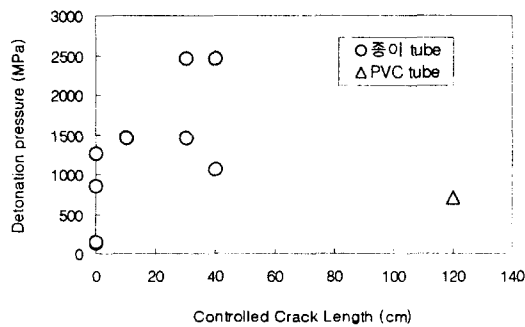
Split tube의 재질은 암괴에서는 종이관을 사용하였으며, 암반에서는 PVC 관을 사용하였다.

암괴에서 균열을 개시하는데 필요한 발파 압력은 약 1.5 GPa이고, 발파 압력의 크기가 2.5 GPa이었을 경우에는 slit 이외의 관의 벽면 부분에서도 균열이 발생하였다.

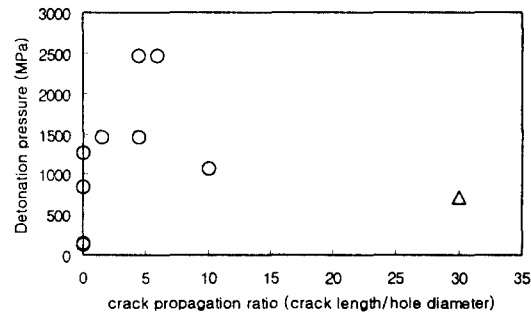
발파 압력의 크기가 1 GPa 이하일 경우 공발 하였으며, 균열을 제어할 수 없었다.

암반의 경우는 이보다 작은 700MPa의 압력에서도 관의 slit 위치에서 균열이 개시하였을 뿐만 아니라, slit 이외의 부분에서는 균열이 발생하지 않았다. Split tube에 의해 제어되어 전파된 균열 길이는 120cm로 공경의 30배 정도였다.

Split tube를 이용한 암반내 균열 제어 발파의 경우 공경의 30배까지 균열이 제어되었으며, smooth blasting, pre-splitting등의 제어발파에서 적용되고 있는 공간격인 공경의 5-10배에 비하여 크게 나타났다.



(a)



(b)

그림 1. Split tube 발파의 발파 압력과 제어된 균열길이

4. 결 론

Split tube를 이용한 균열 제어 발파 현장 실험결과 절단면을 발달시키고자 하는 방향으로 제어할 수 있었으며, slit의 방향으로 균열면이 제어됨을 알 수 있었다.

본 현장 실험을 수행하여 얻어진 결과를 요약 정리하면

1) Split tube를 이용하여 균열을 slit 방향으로 제어할 수 있었다.

2) 암괴의 경우 1GPa 이하의 발파 압력에서는 공발하였고, 1.5GPa의 발파압력 이상일 경우 균열면 제어가 가능하였으며, 2.5GPa 이상의 압력일 경우 slit 이외의 부분에서도 균열이 발생하였다.

3) 암반내 실험에서 700MPa의 발파압력으로 균열 방향을 제어할 수 있었으며, 균열 전파 길이는 120cm로 공경의 30배이었다.

Split tube를 이용한 균열 발생 방향 및 제어에 대한 현장 적용 발파 실험 결과 절단면을 제어할 수 있었으나, 발파공 벽면 및 공 주변의 손상 및 이완 정도를 확인할 수 없었고, 암반내에 존재하는 절리 단층 등의 불연속면이 존재할 경우 균열면의 제어가능 정도를 확인할 수 없었으므로 발파공 주위의 손상 정도와 불연속면에서의 균열제어에 대한 추가적인 연구를 수행 할 예정이다.

사 사

본 발파 실험이 원활하게 이루어질 수 있도록 많은 협조와 지원을 하여준 (주) 00산업의 현장 소장님과 정영준 화약기사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. L. Fourney, James W. Dally, 1977, Grooved boreholes for fracture plane control in blasting, William University of Maryland report to the National Science Foundation, 21p.
2. B. Mohanty, 1990, Fracture-plane control blasts with Satellite holes, 3rd International Symp. on Rock Fragmentation by blasting, pp. 407-412.
3. Per Anders Persson, Roger Holmberg and Jaimin Lee, 1993, Rock blasting and explosives engineering, 540p.
4. 최용근, 서울대학교 석사학위논문, 1996, 장약공 notch와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 실험연구, 54p.
5. U. S. A. National Highway Institute, 1991, Explosives engineering, Rock blasting and overbreak control, 415p.