

석탄광에서 굴진발파 사례 연구

민형동¹⁾ · 정민수¹⁾ · 황남순¹⁾ · 심동석²⁾ · 김수호²⁾ · 홍종걸²⁾

1. 서론

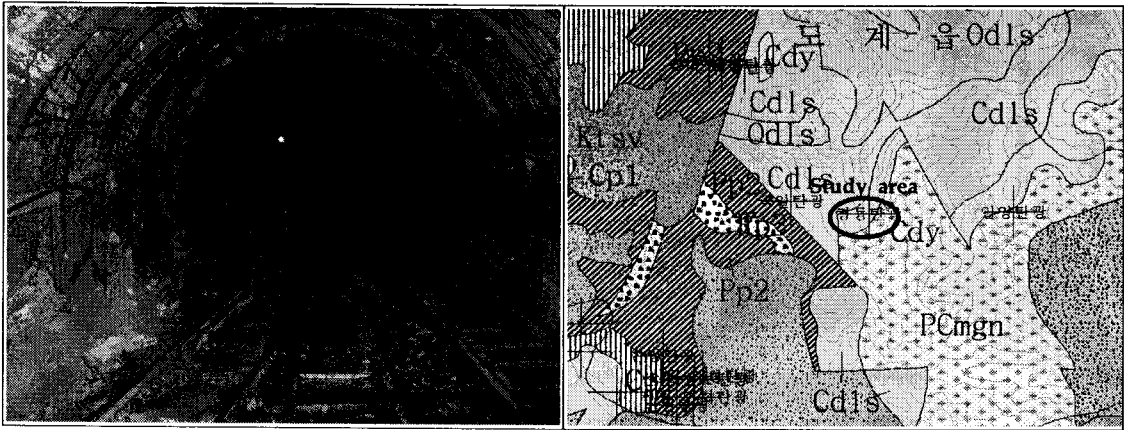
국내 석탄광산의 경우 대부분 지하 심부에서 채굴이 이루어지고 있으며, 광체 또는 탄층을 개발하기 위하여 수갱, 사갱 또는 수평갱 등을 설치하고 있다. 이러한 굴진갱도에서의 발파는 심부의 지압, 지열, 지하수, 갱내환경에 따른 폭약의 제한 등 노천발파에서 볼 수 없는 문제점이 있다. 예를 들어 굴착단면의 소형화로 인한 비장약량 증가, 지하수 누출에 따른 전기적 위험성, 소형 적재 장비의 사용으로 인한 파쇄입도의 소형화, 비산 등에 의한 지주의 손상 등을 들 수 있을 것이다. 또한 사용폭약의 종류도 제한을 받게 되는데, 이는 탄층발파시 갱내 메탄 가스에 의한 폭발을 방지하기 위해 AI관제 뇌관의 사용을 지양하고, 탄광용 검정폭약을 사용하도록 규정하고 있다. 당 현장의 경우 굴진갱도의 단면적은 약 7~15m²로 일반적인 도로 및 철도터널과는 많은 차이가 있으며, 여러 가지 제약이 따르는 현장이다. 따라서 본 사례연구에서는 이러한 조건에서 이루어지는 소단면 발파굴착에 대하여 조사하였고, 발파효율 개선 측면에서 문제점을 도출하고, 개선안을 제시하였다.

2. 지질 및 암반

당 현장 굴진갱도의 암반은 경질 사암에 해당하며, 일축압축강도는 1,000~1,500kgf/cm²의 범위로, RMR 분류에 의하면 Type-1의 암반에 해당한다. N30W-N70W 방향의 대단층이 발달하며 이를 경계로 동부 및 북부와 남서부는 서로 상이한 지질분포를 나타낸다. 배사축부를 따라 함탄층인 사동통이 특징적으로 분포하며, 사동통은 하부의 해성석회암이 협재된 금천층과 상부의 장서층으로 구분된다. 맥폭은 2.2~11.0m, 품위는 6,590kcal/kg정도이다.

1) (주)한화 화약기술팀
2) (주)경동 상덕광업소

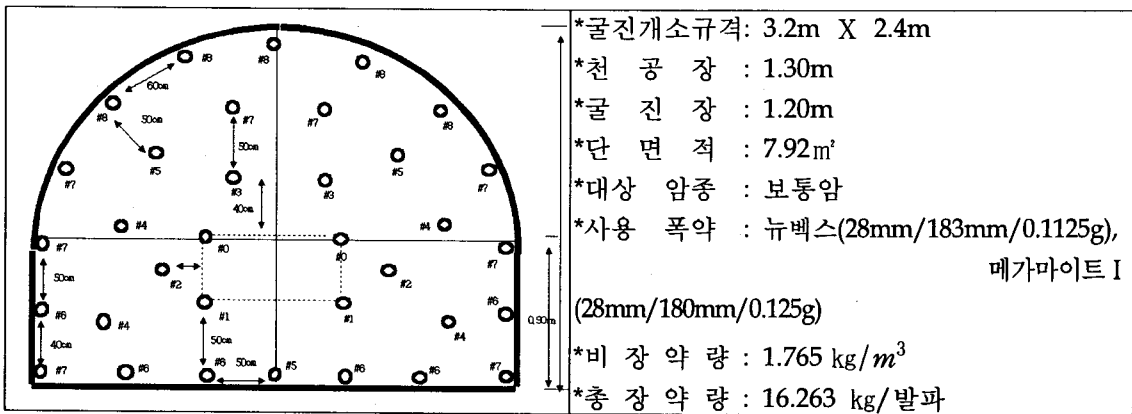
민형동, 정민수, 황남순, 심동석, 김수호, 홍종걸



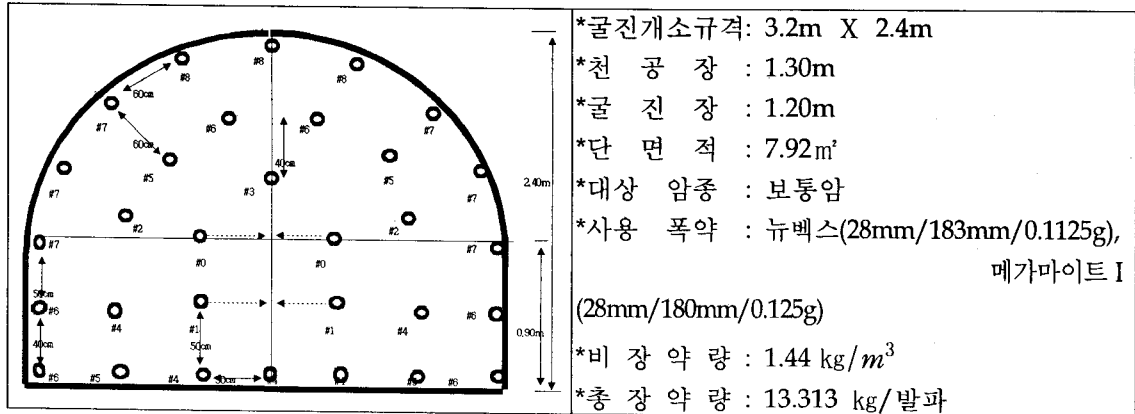
3. 굴진경도 현황

당 현장에는 수갱, 사갱, 수평갱 등의 굴진경도가 존재하며, 단면적은 7~15m²의 범위로 일반 도로 및 철도 터널과는 많은 차이가 있는 전형적인 소단면 터널에 해당된다.

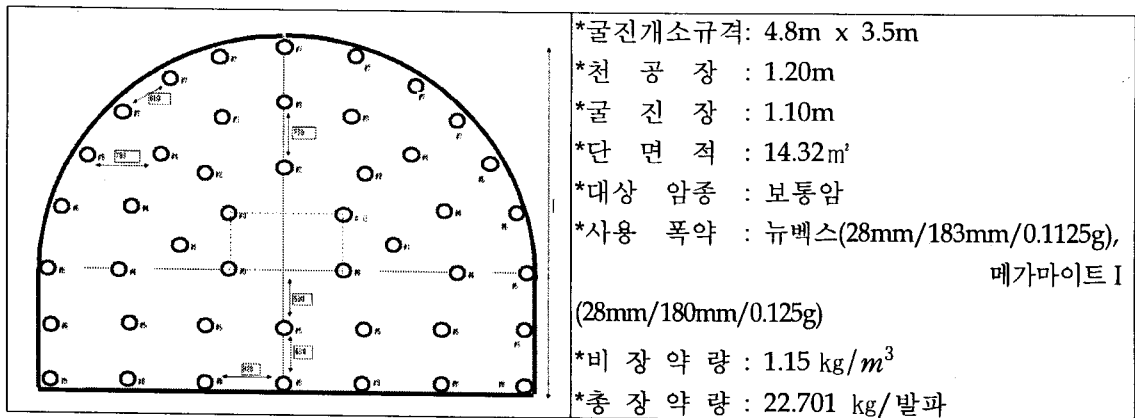
아래 그림에 당 현장에서 수행되고 있는 굴진경도 발파현황을 그림 2에 나타내었다.



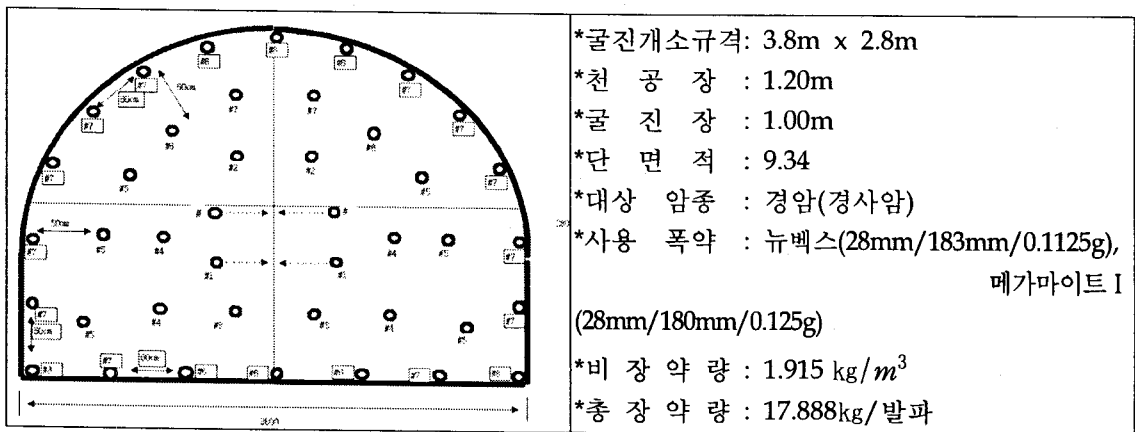
a. 수평갱도(3.2 x 2.4)



b. 승경도(3.2 x 2.4)



c. 수평경도(4.8 x 3.5)



d. 수평경도(3.8 x 2.8)

그림 2. 현장 굴진경도 현황

민형동, 정민수, 황남순, 심동석, 김수호, 홍중걸

4. 작업현황

3장에서 제시된 다양한 굴진경도 중 당 사례연구에서는 3.8X2.8(단면적 9.34m²)에 해당하는 수평경도를 대상으로 발파작업시 개선사항을 도출하기 위해 현장 조사를 실시하였다.

4.1 발파 현황

당 막장의 굴진경도 현황은 그림 2-d와 같이 설계되어 진행되고 있으며, 암반의 강도에 따라 천공의 간격이 변경되고 단면높이와 폭에 따라 천공의 착점 위치나 길이가 다소 변경되어 발파가 시행되고 있었다.

4.2 천공 작업

천공작업은 2대의 착암기를 이용하여 그림 3과 같이 천공을 실시하고 있으며, 심발의 위치는 하단 바로 위에 위치(바닥으로부터 1m 이격지점)하고, 확대공은 Zigzag 형식으로 천공하고 있다. 상부의 굴착 폭을 맞추기 위하여 상향천공을 실시하고 있으며, 암반보강은 Steel Rib, Wire mesh로 막장 면까지 실시하여 안전하게 작업을 하고 있다. 다만, 좁은 단면에서 천공각도를 확보하는데는 다소 어려움이 있다.

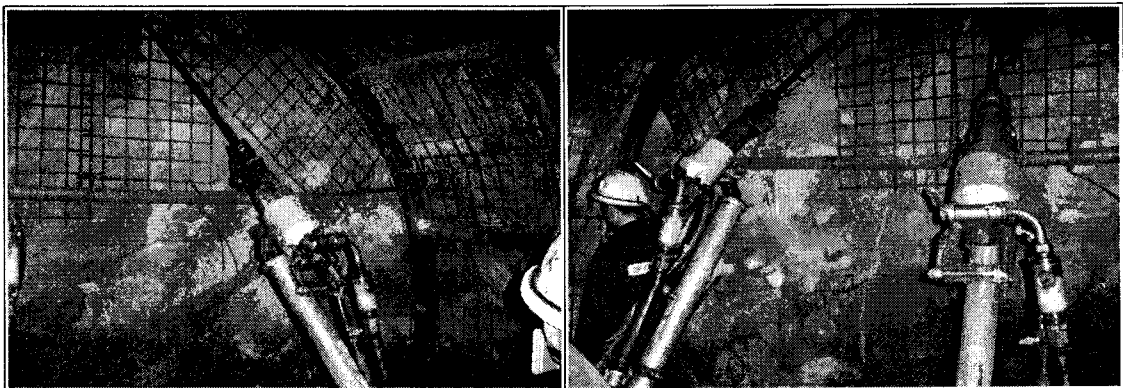


그림 3. 천공 작업

4.3 장약 작업

당 막장의 장약작업은 NewVEX 28mm와 MegaMITE 28mm를 혼용하여 실시하고 있다. 이러한 이유는 주폭약인 MegaMITE의 잔류약이 발생할 경우, 막장 천공시 착암기 Bit의 타격에 의한 폭발사고의 발생을 방지하기 위해 공저부에 NewVEX 1本을 장약하고, 이후 MegaMITE를 장전하고 있다. 장전작업은 그림 4와같이 막장에서 일정거리를 두고 장전하거나, 목봉을 이용하여 1개씩 장전을 하고 있다. 그 이유는 막장면이 불안정하여 장약작업 도중 낙반사고가 발생할 수 있으므로, 이를 방지하기 위함이다.

또한 굴진효율을 증대시키기 위한 방편으로 LP뇌관을 사용하고 있다. 이는 소단면에서는 높은 비장약량으로 암석의 소결이 발생하거나, 응집 저항이 커질 수 있어 발파 실패의 원인이 될 수 있기 때문에 전열공의 발파가 이루어지고, 전열의 발파암반이 완전히 분리된 상태로 후열의 기폭이 되도록 하기 위하여 LP 뇌관을 적용한 것이다. 그러나 LP뇌관 적용은 발파 기폭 순서나 심발의 위치에 따라 배면 파괴에 의한 나약 상태에서 기폭을 유발시킬 수 있고, Cut Off에 의한 잔류약을 발생시키거나, 인접공의 폭약 사임을 발생시키는 원인이 될 수 있기 때문에 장약에 더욱 주의를 요한다.

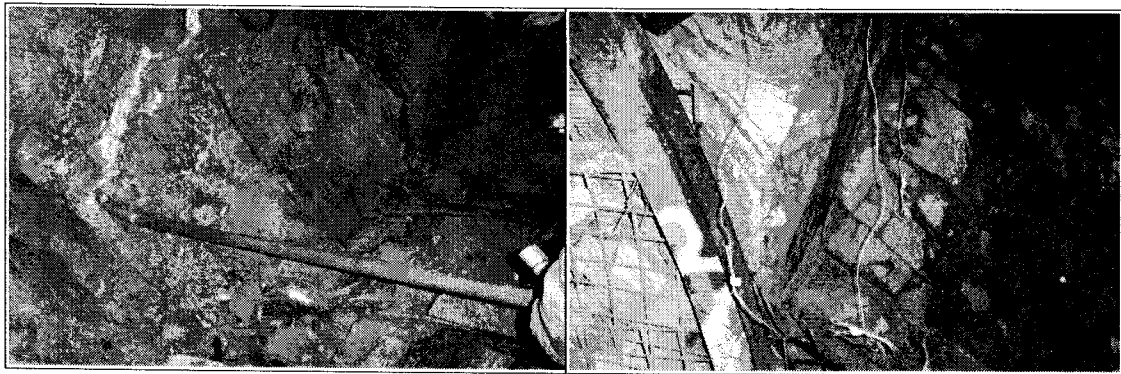


그림 4. 장전 작업

4.4 폐석처리 방법

당 현장의 경우 소형 전기로더(그림 5)를 이용하여 폐석처리 작업을 실시하고 있으므로, 작고 균질한 파쇄입도를 얻어야 폐석처리시간을 단축시킬 수 있다. 일련의 조사과정에서 나타난 폐석의 파쇄입도는 로더작업에 무리가 없는 수준으로 진행되고 있었다.

민형동, 정민수, 황남순, 심동석, 김수호, 홍종걸

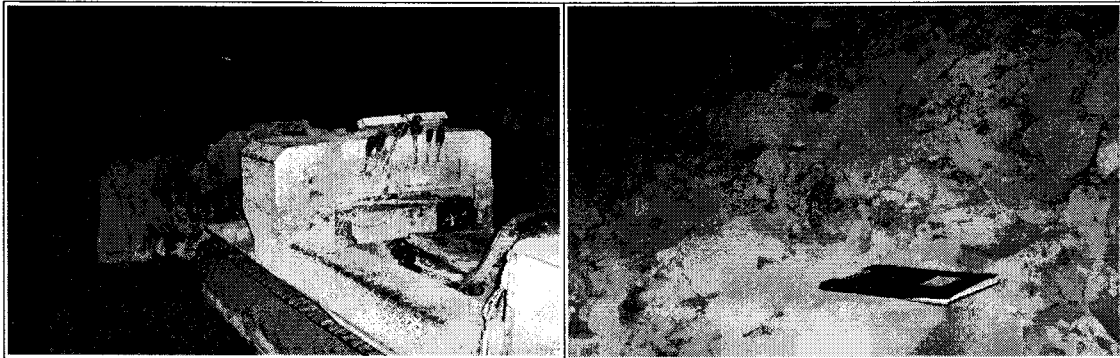


그림 5. 폐석 처리장비(전기로터)와 폐석

4.5 발파효율

당 현장의 경우 발파의 성패는 계획된 굴진효율을 확보하고, 암편 비산에 의한 근접한 지보공의 피해가 없어야 하며, 소형 전기로터(그림 5)에 적합한 균일한 파쇄입도를 얻어야 한다. 당 현장의 파쇄입도는 폐석처리에 문제가 없을 정도로 작고 균질하였으며, 비산이 지보공에 영향을 주지 않아 작업상의 문제는 문제없을 것으로 판단된다.

다만, 굴진율은 약 83%수준(1.0/1.2m)으로 다소 저조하였으며, 잔류공은 하단부에서 10~20cm, 상단부 쪽으로 갈수록 40~50cm로 점차 길어지는 것으로 나타났다. 또한 상반부 잔류공 중 몇몇 공은 공저에서 기폭이 되지 않고 충격압에 의한 소결현상만 발생된 것으로 나타났다. 이는 최초 기폭 되는 심발 위치, 상단부 천공 각도 및 LP뇌관의 시차 등에 의해 발생된 것으로 추측할 수 있다. 당 현장의 발파는 심발 위치가 하단부에 위치하였고, 최초 기폭 시 발생하는 충격파(Shock Wave)에 의한 진동으로, 상부에 초시가 긴 뇌관을 가지고 상향 장전되어 있는 화약이 공구로 빠져 나오면서 기폭 되어, 상반부에 잔류공이 발생된 것으로 판단된다. 따라서 상반부에서 잔류공의 길이를 줄이고 굴진효율을 증가시키기 위해서 심발위치를 높게 하면 조정하고, 심발공 및 심발확대공을 동일선상에 위치시켜, 천공각도를 유지시켜야 할 것이다.

5. 개선사항

5.1 천공패턴

Leg-drill 사용시 기존 심발의 위치는 갱도 바닥으로부터 1m 지점에 위치하고 있어, 천공각도를 맞추기가 어려웠으며, 심발확대공의 천공패턴은 상부확대공과 동일하게 동심원상으로 구성되어, 심발의 보조역할을 하는데는 무리가 있을 것으로 판단되었다. 따라서 심발의 위치는 작업자

의 갱도 바닥으로부터 1.5~1.8m로 상향조정하였으며, 천공의 정밀도를 높이고, 심발확대공의 보조역할을 강화하기 위해 심발확대공을 심발공과 동일선상에 위치하도록 그림 6과 같이 천공패턴을 조정하였다.

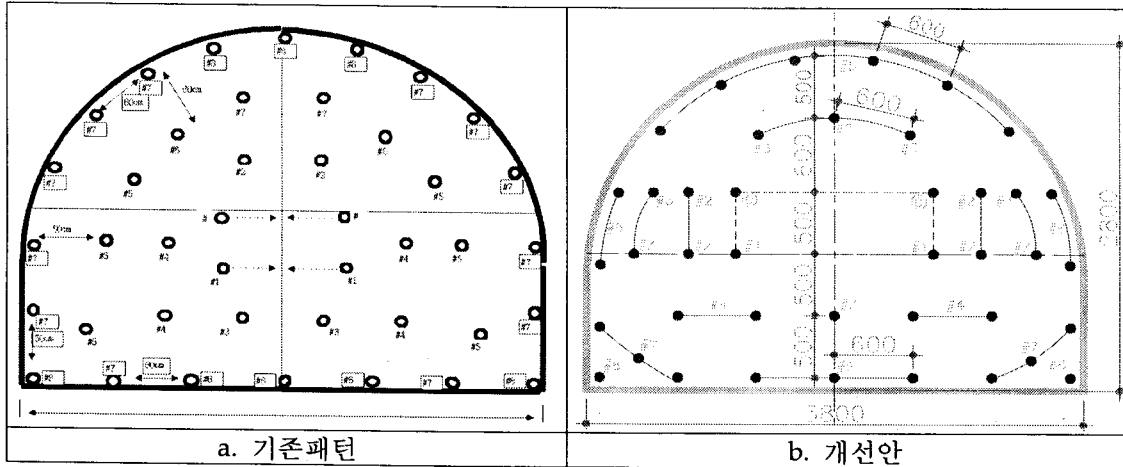


그림 6. Leg Drill 사용시 천공패턴 변화(천공장 1.3m)

또한, Mini Jumbo 적용시 천공오차는 감소하였으나, 심발확대공의 패턴이 상부확대공의 패턴에 맞추어 동심원상으로 배열되고 있어, 심발 보조역할을 강화하기 위해 심발과 열을 맞추어 심발확대공을 그림 7과 같이 배열하였다.

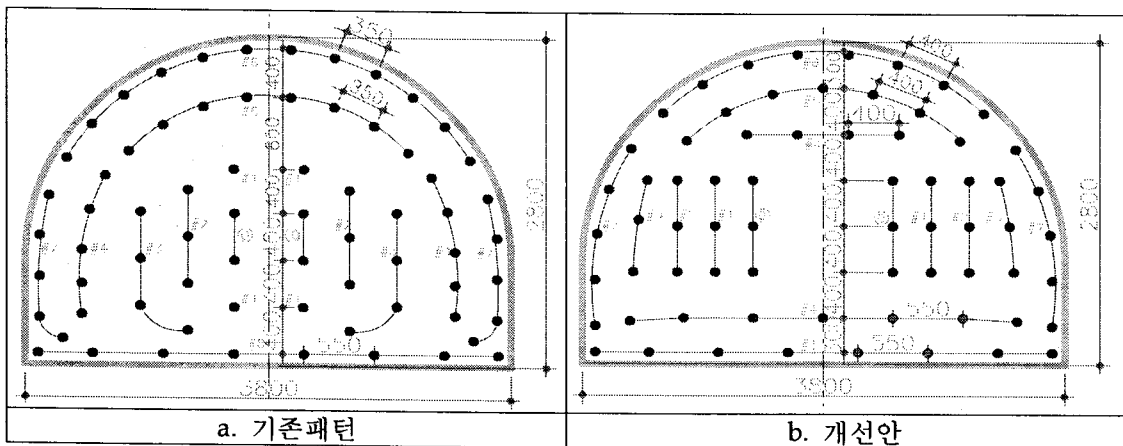
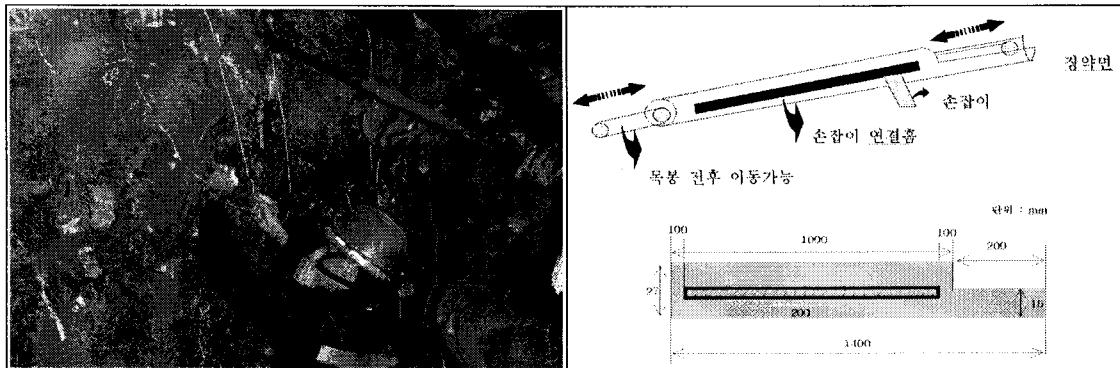


그림 7. Min Jumbo 적용시 천공패턴 변화(천공장 1.8m)

5.2 장약작업

장전작업은 그림 8-a와 같이 목봉을 이용하여 장약을 하고 있으며, 상부공의 경우는 작업자의 손이 닿지 않으므로, 목봉 끝에 약포를 꽂아 장약을 실시하고 있었다. 이때 장약사이에 슬러지나 암반부스러기가 혼입될 수 있어 장약이 용이하지 못 한 경우가 종종 발생하였다.

약포와 약포간 이물질이 혼입될 경우 폭약의 순폭도를 저하시켜 잔류약을 발생시키는 원인이 될 수 있으므로, 장약시 이물질이 혼입되지 않도록 최대한 주의를 기울여 장약을 실시하도록 하였고, 기존 정기폭 방식은 Cut-off의 발생가능성이 있으므로, 역기폭 또는 중기폭을 적용토록 하였다. 이와 함께 그림 8-b와 같이 파이프를 이용하여 장약할 수 있는 장치(연속장전장치)를 제안하였는데, 이는 공내 이물질이 혼입되지 않도록 하고 안전하게 장약할 수 있도록 고안된 것이다.



a. 목봉에 의한 장전작업

b. 연속장전장치(제안사항)

그림 8. 장약작업 개선

표 1. 개선사항 요약

| 항 목 | 기존현황 | 개선안 |
|------|--|--|
| 천공작업 | <ul style="list-style-type: none"> • 천공오차 큼 • 심발위치 : 공저부에서 1m 상부 | <ul style="list-style-type: none"> • 천공오차 개선(천공패턴 조정) • 심발위치 : 공저부에서 1.5~1.8m 상부 |
| 장약작업 | <ul style="list-style-type: none"> • 정기폭 적용(Cut-off 발생가능) • 목봉을 이용한 장약 | <ul style="list-style-type: none"> • 역기폭 또는 중기폭 적용 • 연속장전장치(제안사항) |

6. 시험발파

6.1 시험발파 조건

당 현장의 발파효율을 증대시키기 위해 상기 4, 5장에서 검토된 문제점 및 개선사항을 토대로 굴진장 증대를 위해 표 2 및 그림 9과 같은 개선 패턴으로 시험발파를 실시하였다.

표 2. 시험발파 조건

| 구 분 | | Leg Drill 적용시 | Mini Jumbo 적용시 |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|
| 단 면 적(m ²) | | 9.34 | 9.34 |
| 천 공 장(m) | | 1.3 | 1.8 |
| 천 공 수(공) | | 41 | 68 |
| 장약량(kg) | MegaMITE 28mm | 16.125 | 38.0 |
| | NewVEX 28mm | 2.3625 | 6.3 |
| | 합 계 | 17.513 | 44.3 |

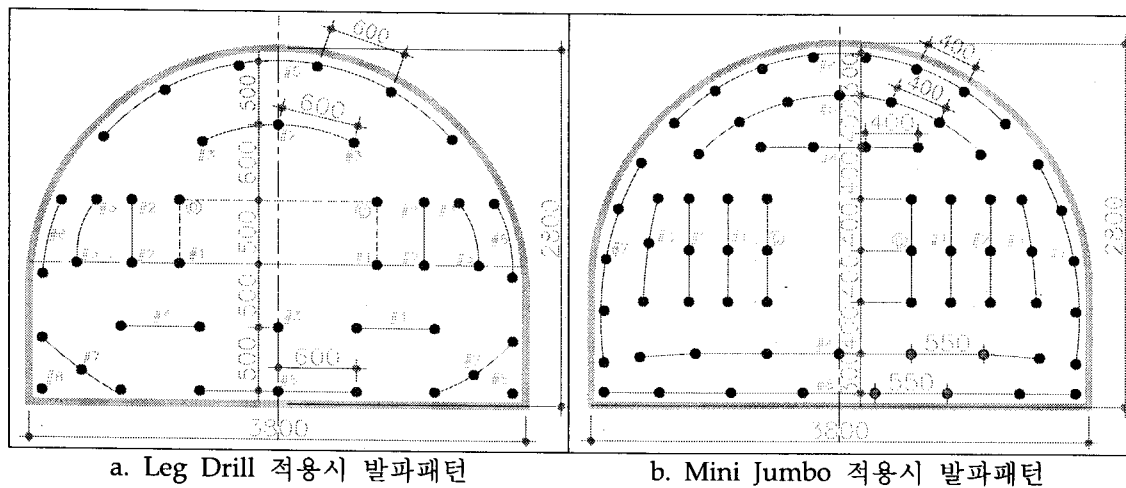


그림 9. 시험발파 패턴

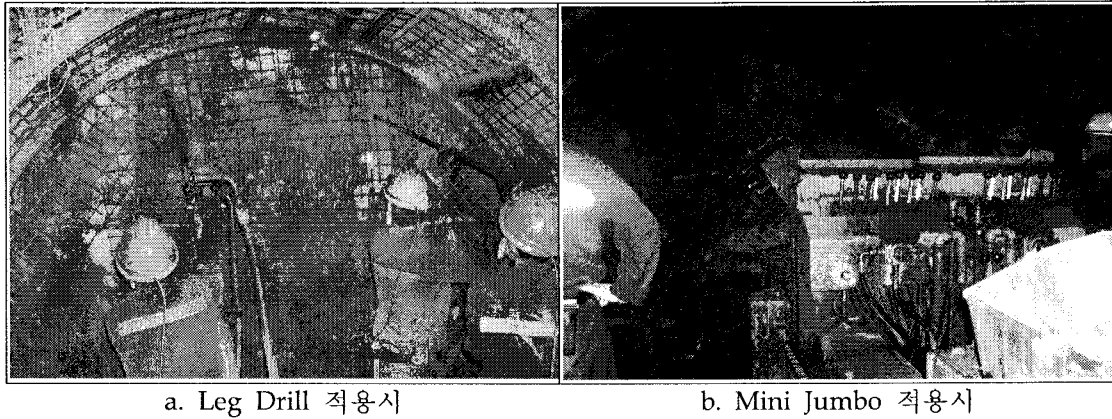


그림 10. 적용 천공장비 현황

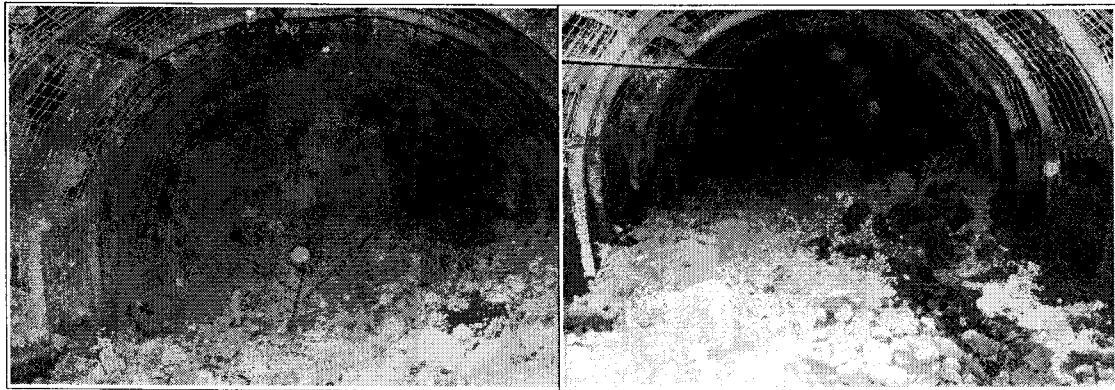
6.2 시험발파 결과

당 현장의 제안 시험발파 패턴에 의한 발파결과는 표 2와 같으며, 장약량 및 천공수가 동일한 수준에서 Leg Drill 사용시 약 9%, Mini Jumbo 사용시는 약 5%의 굴진율 향상이 있었다. 또한 비장약량 및 비천공장의 개선효과도 볼 수 있었다.

다만, 동일한 단면에서 Mini Jumbo 사용시 천공수 감소를 기대하였으나, 실제 단면폭이 2.8m로 천공각도를 확보하기 어려웠으며, 이로 인해 불가피하게 천공수를 감소시켜 적용하기는 어려운 점이 있었다. 그러나 굴진경도의 특성상 무엇보다도, 굴진장 증대가 가장 큰 이점이 될 수 있고, 굴진장 증대로 인한 효율적인 발파 Cycle을 이룰 수 있었다는 점에 의의를 두었다.

표 2. 시험발파 결과 비교

| 구 분 | Leg Drill 사용시 | | Mini Jumbo 사용시 | | |
|--------------------------|---------------|--------|----------------|--------|--------|
| | 기존발파 | 시험발파 | 기존발파 | 시험발파 | |
| 천 공 장(m) | 1.2 | 1.3 | 1.8 | 1.8 | |
| 굴 진 장(m) | 1.0 | 1.2 | 1.6 | 1.7 | |
| 굴 진 율(%) | 83 | 92 | 89 | 94 | |
| 천 공 수(공) | 42 | 41 | 68 | 68 | |
| 장약량(kg) | MegaMITE 28mm | 16.5 | 16.125 | 38.5 | 38.0 |
| | NewVEX 28mm | 2.3625 | 2.3625 | 6.075 | 6.300 |
| | 합 계 | 17.888 | 17.513 | 44.575 | 44.300 |
| 비장약량(kg/m ³) | 1.915 | 1.563 | 2.982 | 2.790 | |
| 비천공장(m/m ³) | 5.396 | 4.756 | 8.191 | 7.708 | |



a. Leg Drill 적용 발파 후

b. Mini Jumbo 적용 발파 후

그림 11. 발파 후 막장면 전경

7. 결 론

1) 국내 석탄광의 경우, 대부분 지하 심부에서 채굴이 이루어지고, 굴진경도의 대부분은 소단면 터널에 해당하여 일반 도로 및 철도 터널과는 많은 차이를 보인다. 본 고에서는 이러한 소단면 굴진경도의 작업조건, 발파패턴, 사용장비 및 발파결과 등에 대한 내용을 조사하여 소개하고자 하였다.

2) 당 현장의 경우, 단면의 협소, 상부지압, 암반강도, 지하수 유출 등의 이유로 발파효율의 저하를 나타내었으며, 이를 개선하기 위해, 발파패턴 조정, 작업방식 변경 등을 통하여 약 5~9%의 굴진을 향상을 이루었다.

3) 파쇄입도는 소형 전기로더를 사용하는 현장 특성상 작업에 무리가 없는 수준이어야 하며, 일반적으로 적을수록 유리하다. 개선된 패턴을 적용결과, 파쇄도는 기존 발파와 대비하여 동등한 수준으로 나타나 큰 차이는 없었다.

4) 당 사례연구에서는 국내 석탄광에서 이루어지는 굴진발파에 대하여 알아보았으며, 문제점을 도출하고, 개선방안을 제시하였다. 향후, 2.0m 이상의 굴진을 확보하기 위해 심발패턴과 장비를 변경하여 적용하고자 한다.

민형동, 정민수, 황남순, 심동석, 김수호, 홍종걸

참고문헌

1. 갱도 굴진 막장에서 굴진 효율을 증대 할 수 있는 발파패턴 제안서, 2006, (주)한화
2. 소단면터널에서 효율적인 발파패턴에 관한 연구, 강원대학교 석사학위 논문, 2006, 권오성
3. Stig. O. Olofsson, 1991, Applied Explosives Technology for Construction and Mining