

터널발파 작업시 여굴 저감을 위한 천공방법 연구

김양균, 김형철, 유정훈¹⁾

A Study on the Drilling Methods to reduce Overbreak in Tunnel Blasting

Yangkyun Kim, Hyungchul Kim, Jounghoon Yoo

ABSTRACT. Overbreak or underbreak is one of the most important factors in evaluating the results of a tunnel blasting. Overbreak, which depends on the quality of rock, the type and quantity of explosives, and drilling conditions, has been a target of challenge to many blasting engineers because it directly affects construction cost. Drilling is generally known as one of the primary factors to generate overbreak. This study presents a real working model to reduce overbreak based on the analysis of drilling accuracy and overbreak generated from various working methods related to drilling.

As the first step of the study, 45 experiments have been performed. The factors investigated are: marking contour line, the position of perimeter holes, the change of look-out with drilling rig position, and the proper space between perimeter holes. It is concluded that workers and engineers' will and efforts are the most important factors to reduce overbreak and that improving drilling method and pattern could reduce overbreak to a considerable amount.

Key words : Overbreak, Look-out, Perimeter Hole, Marking

초 록. 여굴 또는 미굴은 터널발파 결과를 평가하는데 있어서 가장 중요한 지표중 하나이다. 폭약량과 종류, 암질상태, 천공상태에 따라 좌우되는 여굴은 터널시공의 경제성과 직결되므로 현장의 많은 발파기술자들은 이를 최소화하기 위한 노력을 끊임없이 시도하여 왔다. 일반적으로 천공은 여굴을 야기하는 가장 중요한 요소로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 천공과 관련된 다양한 작업방법들이 여굴과 천공의 정확도에 미치는 영향을 분석하여 여굴을 저감하기 위한 실제 작업모델을 제시하고자 하였다. 이를 위해 1차적으로 굴착선공 적정 공간격, 점보드릴의 천공각 변화, 굴착선공 천공착점 위치, 굴착선공 표시 등 4개 항목 45회의 실험을 실시하였다.

여굴을 줄이기 위해서는 작업자 및 감독자들의 의지와 노력이 무엇보다도 중요하였고 천공방법 및 패턴을 일부 개선함으로써 천공으로 인한 여굴량을 적지 않게 줄일수 있다고 판단되었다.

핵심어 : 여굴, 천공각, 굴착선공, 굴착선 표시

1. 서 론

터널발파 결과를 평가하는데 있어 가장 핵심적인 사항은 굴진율, 소음·진동의 크기 그리고 굴착면의 상태 즉, 여굴 및 미굴의 크기라고 할 수 있으며 이러한 3가지 요소를 최적화하기 위해 지금까지 국내 외적으로 다양한 연구와 실험이 진행되어 왔다.

이중에서 여굴 및 미굴 문제는 각각 경제성 및 시공성과 직결되는 사항이므로 어느 한쪽도 소홀히 생각할 수 없고, 현실적으로 두 가지를 동시에 완전

히 제거할 수 없기 때문에 현장 기술자들은 이를 최소화하기 위한 노력을 끊임없이 시도하여 왔다.

터널발파의 경제성을 좌우하는 요인중 하나인 여굴은 암질상태, 화약특성 그리고 천공 등 작업방법에 따라 정도가 좌우된다. 즉, 암질이 불량한 구간에서는 다른 요인보다도 특히 암반의 특성이 여굴에 중대한 영향을 미칠 것이고 암질이 양호한 구간에서는 천공상태가 상대적으로 중요하게 된다. 이중에서 암질상태는 인위적으로 조절 불가능한 요인이고 화약특성은 국내의 경우 여굴 형성에 가장 큰 영향을 미치는 굴착선공에는 정밀폭약이 일반적으로 사용된다는 점을 고려할 때 현장에서 여굴을 현실적으로 조절할 수 있는 요인은 천공각 및 공간격

1) 코오롱건설(주)

접수일 : 2003년 5월 2일

등과 같은 천공방법 및 패턴으로 귀착된다.

또한 실제적인 작업에 있어서 여굴 형성에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 천공방법이라는 것을 경험적으로 알고는 있지만 전체 여굴을 정확하게 평가하기 위한 적절한 장비 및 방법이 일반화되지 못하였기에 천공과 관련된 세부적인 항목들에 대한 정량적인 평가 및 방법을 개선하기 위한 시도가 미흡하였다.

따라서 본 연구에서는 현장에서의 작업 관찰을 토대로, 천공이 여굴에 미치는 요인을 천공전 굴착 표시시 방법, 점보드릴 위치에 따른 천공각 설정, 실제 천공이 이루어지는 천공착점의 위치, 굴착선공 천공간격 등 4가지로 세분하고 각 항목별로 평상시 및 개선시 작업상태가 여굴 및 천공의 정확성에 미치는 영향을 분석하여 이를 토대로 여굴을 저감하기 위한 천공방법을 제시하고자 하였다.

다만, 아직 실험이 진행 중이고 추가 실험이 필요한 항목도 있으므로 본 논문에서는 지금까지 진행된 실험에 대해서만 정리하였다.

2. 현장 여굴관리 실태

본 연구기간 중 실시된 현장조사 및 기존 문헌에서 밝혀진 여굴 유발 요인은 암질상태를 제외한다면 설계굴착선 표시부터 장약 작업까지의 다양한 세부 공종에서 나타나고 있으며 이를 원인에 따라 구분하면 작업자들의 관습으로 인한 인위적인 문제와 발파관련 자재 및 장비에 기인한 작업 도구상의 문제로 대별될 수 있다. 즉, 작업성을 유지하면서 획기적으로 여굴을 저감할 수 있는 방법이나 장치가 현실적으로 부재한 상황에서 최선의 여굴저감 방법은 여굴을 최소화하기 위한 작업자 및 시공관리자들의 의지와 적절한 첨단 장비 사용이라고 할 수 있다.

예를 들어 현장에서 시공업체는 여러 가지 목적 또는 원인에 의해 신속한 굴진에만 관심을 갖게 되는 경우가 많은데 이때 발파관리가 대체로 부실하게 되어 과대여굴 발생 빈도가 증가하게 된다. 이와는 달리 세심한 작업관리 외에 컴퓨터가 장착된 점

보드릴, 전자뇌관, 레이저를 이용한 터널 단면 측량기 등 발파관련 첨단 도구들을 활용하여 여굴을 저감할 수 있었다는 국의 사례가 적지 않게 보고되고 있으며 이에 따라 국내에서도 일부 첨단장비의 사용이 점차 증가하고 있다.

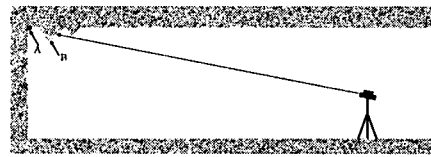


그림 1. 현장에서의 내공 측량방법

현장에서 여굴을 포함한 터널 내공단면을 측량하는 방법은 일반적으로 다음과 같다. 그림 1과 같이 내공을 측량하고자 하는 지점에 반사경을 위치시킨 후 막장 후방에 설치된 광파측정기를 이용하여 측정하거나 또는 광파측정기에 설치된 레이저로 직접 해당 지점의 내공을 측정한다. 그러나 발파후 터널 막장주변의 암반상태는 매우 굴곡이 심하기 때문에 그림에서 나타난 바와 같이 A지점의 여굴량을 측량하고자 하여도 B와 같은 돌출부위가 있으면 측량이 난해하다. 따라서 대체적으로 광파측정기로 측정 가능한 가시상태에 있는 부위만을 측정하게 되고, 측정도 막장 주변 모암의 Sealing후 또는 Shotcrete 타설 후에 이루어지므로 실제 발파후 발생한 여굴량과는 적지 않은 오차가 발생하는 경우가 많다. 또한 이러한 측량의 용도가 여굴을 측량하기 위해서라기 보다는 미굴 부위 확인을 위한 측량이 대부분이므로 여굴관리는 상대적으로 소홀해지는 경향이 있다.

한편 한국도로공사에서 조사한 국내 터널현장에서 발생하는 여굴량 결과¹⁾에 의하면 반단면에서의 평균 여굴깊이는 41.2cm, 전단면에서는 34.5cm로 나타나고 있다. 이것이 국내 도로터널에서의 일반적인 현실이라고 한다면 이를 충진하기 위한 재료비만 해도 국가적으로 엄청난 금액이 될 것이다.

아울러 한국도로공사에서는 여굴이 암질상태 및 외곽공 간격, 비장약량 등에 따라 변화하지만 결과

적으로 여굴발생에 영향을 미치는 가장 큰 원인은 천공이며 천공 정밀도를 확보한 상태에서 최적의 패턴설계가 이루어져야만 여굴을 줄일 수 있다고 하였다.

3. 현장실험

3.1 현장개요

본 실험은 강원도 속초부터 인제를 연결하는 미시령터널건설공사 현장에서 실시되었다. 미시령터널은 국가지원 지방도 56호선 15.7km구간 중 민간 투자사업으로 건설되는 3.6km 2차선 쌍굴 도로터널이며 미시령을 통과하는 기존 도로의 도로 폭이 협소하고 평면 및 종단선형이 불량하여 동절기 강설 및 동결에 의한 교통 통제 및 교통사고의 위험해소와 안전하고 경제적이며 미래지향적인 보조 간선도로 건설을 위해 시공되는 터널이다.

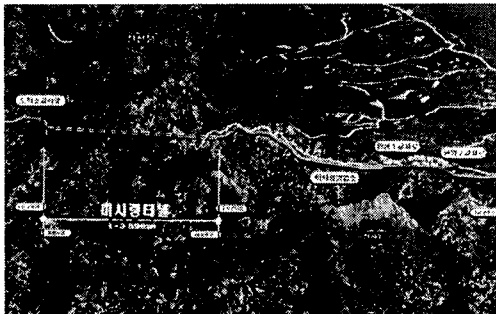


그림 2. 현장 위치도

본 지역은 옥천변성대 북측에 해당하여 대보화강암과 대보화강암의 관입시 변성작용을 받은 화강암질 호상 편마암이 기반암으로 분포하고 있다.

- 위치 : 강원도 인제군 북면 용대리(시점) ~ 강원도 고성군 토성면 원암리(종점)
- 터널 길이 : 3.565 km
- 공사 기간 : 2001. 7 -2006. 7
- 터널 제원 : 10.8m(폭) × 8.3 m(높이)

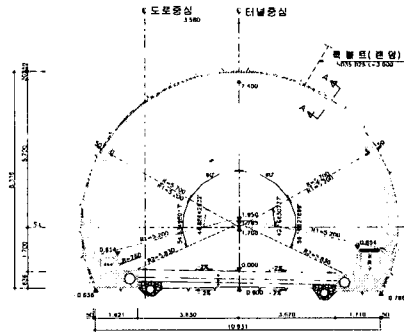


그림 3. 터널 단면 (Type 1)

3.2 실험개요

사전 현장조사를 통해 착안되었거나 기존 연구사례를 통해 나타난 여굴저감 방안중 현장에서 현실적으로 적용 가능한 항목을 발췌하여 실험을 실시하였다. 즉, 천공과 관련된 4가지 주요 작업항목에 대해 기존방법 대 수정방법으로 비교실험을 실시하여 각 방법에서의 여굴량 및 천공정확도에 미치는 영향을 분석하였다.

터널 단면 측량 및 천공착점 위치 측정, 천공각 측정은 AMT Profiler 4000을 이용하였다. 본 측량은 광파를 이용하여 별도의 표적판 없이 터널단면 또는 임의의 물체 표면 형상을 자동으로 측정하는 장비로서 개략적인 성능은 표 1과 같다.

표 1. AMT Profiler 4000의 성능 개요

측정속도	17 - 86 points/분 (보통 40 points)
정밀도	3 - 15 mm (측정속도에 따라 좌우)
측정가능거리	0.8 m - 350 m
1단면 측정시간	약 5 - 7분 (장비 설치시간 포함)



그림 4. Profiler를 이용한 여굴측량

2002년 9월부터 2003년 5월까지 현장에서 실시된 실험 7가지 항목의 실험횟수는 총 67회였으며 이 중 아직 진행 중인 실험을 제외한 4가지 항목 45회의 실험에 대해서만 결과를 표 2에 정리하였다.

천공에 사용된 점보드릴은 그림 5의 Atlas사의 Rocket Boomer 353E이며 개략적인 제원은 표 3과 같다.

표 3. 사용 점보드릴 제원

장 비	길이(mm)	13,670 (Feed 포함)
	높이(mm)	3,400
	폭(mm)	2,500
최대작업 범 위	높이(mm)	12,680
	폭(mm)	15,330



그림 5. 점보드릴 전경

표 2. 실험내용 요약

실험명	횟수	내용	비고
굴착선 표시 정밀도 효과	10	굴착선 표시할 때 표시빈도에 따른 굴착선 및 천공착점의 정확성 조사	
천공방법에 따른 천공각 변화	10	점보드릴의 천공 위치 및 작업자의 의지에 따른 천공각 변화 조사	
천공착점 위치 효과	9	천공착점 위치에 따른 여굴량차이 조사	
굴착선공의 적정 천공패턴 실험	16	굴착선공의 공간격을 변화시켰을 때 발생하는 여굴량차이 분석	2-5 등급에서 실시
실험 횟수 계	45		

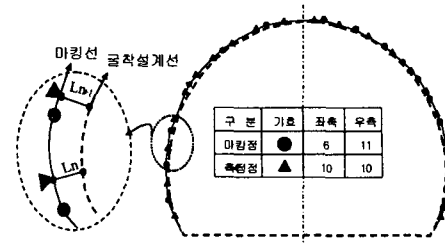
(1) 굴착선표시 정밀도 효과

컴퓨터가 장착되지 않은 점보드릴로 천공시, 천공을 위해서는 막장에 터널 내공의 굴착설계선을 표시하는 마킹(Marking)작업을 실시하여야 한다. 표시된 굴착설계선상에 점보드릴의 비트를 일치시키며 천공은 시작되므로 표시된 굴착선의 정확도에 따라 천공착점의 기본적인 오차가 결정된다고 할 수 있다.

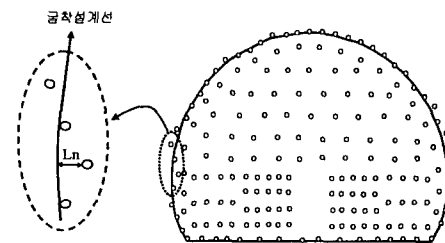
마킹은 광파측정기의 도움을 받아 설계서상의 굴착설계선 위치에 일정한 간격으로 점을 표시 한 후 그 사이를 선으로 연결해가며 완성된다. 따라서 표시 위치가 정확하지 못하고 오차가 심하다면 그만큼 굴착설계선에 대한 천공착점의 오차 또한 증가할 수 있고 그에 따라 여굴 또는 미굴이 심해질 수 있다.

본 실험에서는 한 막장을 좌우측으로 분할하여 양측의 마킹 빈도 즉, 표시 간격을 다르게 하였을 때 실제 굴착설계선으로부터 표시지점 및 천공착점까지의 오차를 분석하였다. 예를 들어 좌측은 표시 빈도를 6개로 하여 1m간격, 우측은 11개 지점으로 하여 0.5m간격으로 굴착선을 표시하였을 때, 좌우측 각각 굴착선상 임의의 10개 지점에서 실제 굴착설계선으로부터의 이격거리를 측정하여 이 값의 표준편차를 구한다. 이어서 상기 표시 지점 상에 천공할 때 굴착설계선에 대한 천공착점의 표준편차도 측정하였다. 한편 RMR 기준 암반등급이 4, 5 등급인 도로터널에서는 대체로 강지보가 설치되고 천공시 강지보를 굴착설계선 대신 활용하므로 대부분의 현장에서는 막장에 별도의 굴착선 표시를 하지 않고 천공을 하는데 이에 따른 천공착점의 오차도 분석해 볼 필요가 있다.

굴착설계선으로부터 각 측정지점까지의 거리는 좌표변환과정을 거친 측정값과 굴착설계선을 중첩시키므로써 계산할 수 있으며 표시지점 및 천공착점의 위치 측정은 Profiler를 이용하였다.



(a) 굴착선 표시 오차 조사



(b) 천공 오차 조사

그림 6. 굴착선 표시 및 천공오차 조사 방법

(2) 천공착점 위치 효과

현장에서 굴착선 표시를 할 때 가장 중요하게 고려하는 사항중 하나는 굴착설계선으로부터의 이격거리이다. 시공업체에서는 암반상태 및 발파결과를 참고로 마킹 지점을 결정하게 되는데 미굴을 최소화하기 위해 현장에서는 실제 굴착설계선 외측으로 표시 및 천공을 하는 경향이 있다. 천공을 외측으로 할수록 미굴은 감소하지만 여굴은 당연히 증가하게 된다. 이러한 사유로 발생하는 여굴량이 전체 여굴량에 적지 않은 비중을 차지하는 것이 현실이며 강지보가 적용되는 불량한 암질에서는 더욱 그렇다.

따라서 본 실험에서는 굴착선공에 주장약으로 정밀폭약을 사용시 미굴과 여굴을 최소화할 수 있는 천공착점의 위치를 규명하기 위하여 천공착점의 위치와 여굴 및 미굴량과의 상관관계를 분석하였다.

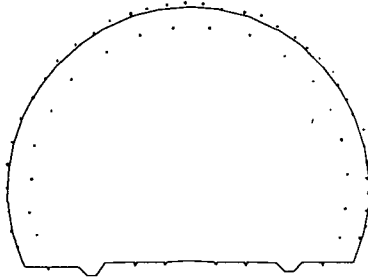


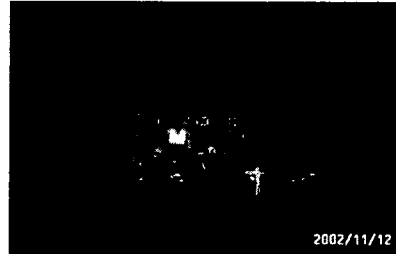
그림 7. 굴착선공 및 전열공위치 측정 결과 예

(3) 천공방법에 따른 천공각 변화

천공각은 여굴량의 크기와 직접적인 관련이 있다. 천공각이 1°씩 증가할 때마다 3m 천공장인 경우 천공저부에서 대체로 약 5cm, 천공장 전체에서 평균 약 2.5cm씩 증가한다. 물론 차후 천공을 위한 기본적인 천공각이 필요하지만 천공기사의 부주의나 미굴 방지만을 인해 천공각이 과도하게 증가한다면 여굴 및 자재비는 선형적으로 증가하게 된다. 이러한 천공각을 감소시키기 위해 극히 일부 현장에서는 상황에 따라 점보드릴을 좌우로 이동시켜가며 천공을 실시하기도 한다.

따라서 본 실험에서는 기존의 작업방법대로 터널 중앙에 점보드릴을 고정시켜 전단면을 천공할 때와 좌우측 한쪽으로 이동하여 굴착선공을 천공할 때 발생하는 천공각의 크기 및 그에 따른 여굴량을 비교하였다. 중앙에 고정시켜 천공할 때는 일상적으로 천공할 때(A방법)와 장비기사가 적당히 천공각을 줄이려고 노력했을 때(B 방법)로 구분하였으며, 이동하여 천공할 때는 실제 작업 상황에 따른 차이를 확인하기 위하여 터널중앙부에서 굴착선공을 제외한 대부분을 천공한 후 점보드릴 앞쪽만 좌측으로 비스듬하게 이동한 채 나머지 굴착선공을 천공하는 방법(C 방법)과 점보드릴 전체를 완전히 좌우측 한쪽으로 이동하여 굴착선공을 천공하는 방법(D 방법)으로 구분하였다.

천공각 역시 Profiler를 이용하여, 천공시 점보드릴의 Feed 끝단과 천공입구 2곳의 위치를 측정한 후 3차원 공간좌표 상에서 터널축과 이루는 각을 계산하여 분석하였다.



(a) 터널 중앙에 고정시 (A,B 방법)



(b) 장비 앞쪽만 이동시 (C 방법)

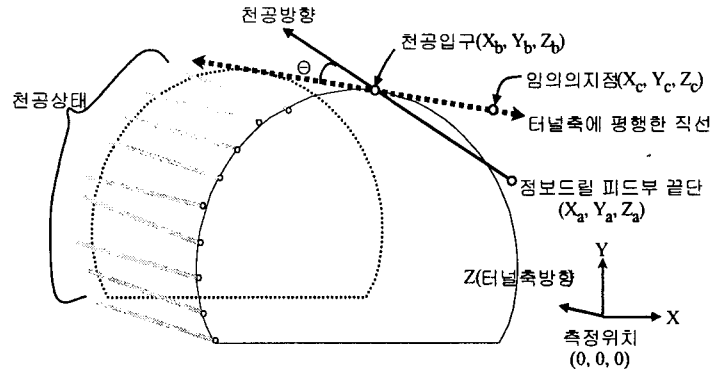


(c) 장비전체 이동시 (D 방법)

그림 8. 점보드릴 작업 위치

(4) 굴착선공의 적정 천공간격 실험

현재 국내 터널발파 설계 및 시공에 있어 굴착선공의 공간격과 저항선은 암반등급에 관련없이 일정하거나 2분화되어 있는 것이 대부분이다. 그러나 암반상태에 따라 공간격과 저항선을 적절히 조절함으로써 발파시 폭발력의 집중 또는 약화로 인한 여굴 및 미굴 발생을 감소시킬 수 있으므로 국외에서는 나름대로의 경험과 발파실험을 토대로 암반등급에 따라 적절한 공간격 및 저항선을 적용하기도 한다.



$$\cos \theta = \frac{o \cdot l + p \cdot m + q \cdot n}{\sqrt{o^2 + p^2 + q^2} \cdot \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}$$

$$= \frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}$$

$$d_o = X_c - X_b = 0$$

$$p = Y_c - Y_b = 0$$

$$q = Z_c - Z_b$$

그림 9. 점보드릴 위치에 따른 천공각 변화 실험

이상돈 등¹⁾은 암질이 불량한 경우에는 간격을 줄일 필요가 있지만 대체적으로 60cm내외가 적당하며 암질이 균질한 경우에는 70cm 이상으로 설계하는 것도 가능하다고 하였다.

본 연구에서는 여굴에 가장 큰 영향을 미치는 굴착선공에서 암반등급에 따른 적정 천공간격을 실험적으로 파악하기 위하여 굴착선공의 공간격을 현장에서 통용될 수 있는 범위 내에서 인위적으로 설정하여 이에 따른 여굴량을 분석하였다.

이를 위해 한 막장을 좌측, 천단, 우측으로 3등분하고 각 부위별로 다른 공간격으로 표시한 후 그 지점에 천공을 하도록 하였다. 공간격은 암질타입에 따라 45-75cm로 변화시켰으며 천공시 천공착점 설정오차가 발생하므로 천공 후에는 Profiler를 이용하여 굴착선공 및 굴착선전열공 전체의 착점위치를 실측하였다. 발파후 부서 정리 전 여굴을 측정한 후 이를 굴착선공 및 굴착선전열공의 천공착점위치와 중첩시켜 각 부위별로 천공착점으로부터의 여굴량을 계산하였다.

점보드릴의 위치는 터널 중앙에 고정하였고 폭약은 굴착선공에 32mm 다이내마이트와 17mm 정밀폭약을 사용하였다.

한편, 여굴량은 굴착설계선으로부터 터널내공까지

의 거리를 나타내지만 이는 천공착점의 위치를 무시한 거리이므로 실제 천공각 및 발파에 의한 여굴 발생효과를 확인하기 위해서는 천공착점으로부터 터널내공까지의 거리로 표현하는 것이 타당하다고 사료되었다. 즉, 천공착점의 위치가 굴착설계선으로부터 20cm 이격되었을 경우 발생한 여굴량이 30cm일 경우와 천공착점이 5cm이격 되었을 때 발생한 여굴량이 20cm일 경우 표면적인 여굴은 전자가 크지만 실험 또는 작업에 의한 실제적인 여굴량은 후자가 더 크다고 할 수 있기 때문이다.

표 4. 굴착선공 적정공간격 실험을 위한 장약설계

암반등급 (RMR 기준)	천공장 (m)	기준공간격 (cm)			저항선 (cm)	굴착선공 사용폭약(개)	
		S1	S2	S3	B	DM	PE
2	3.3	75	65	55	75	1	6
3	2.1	75	65	55	75	1	4
4	1.6	70	60	50	70	1	3
5	1.3	65	55	45	65	1	2
비고	DM=다이내마이트 32mm(375g)						
	PE=정밀폭약 17mm(100g)						
사용뇌관 : MS 및 LP 전기뇌관							

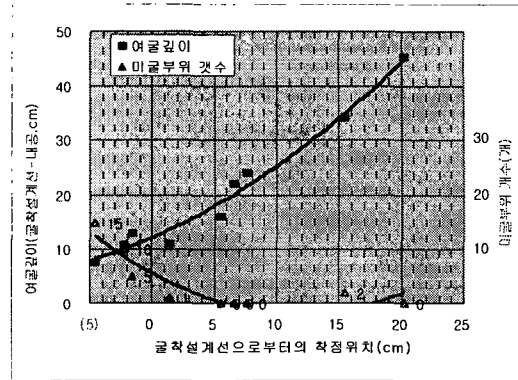
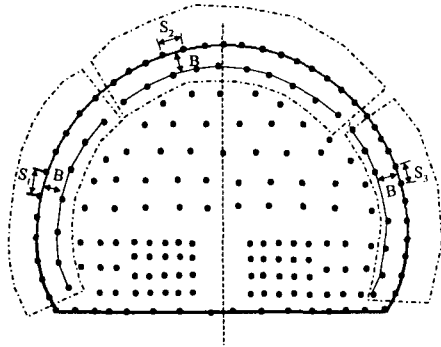


그림 11. 천공착점위치에 따른 여굴 및 미굴 발생 양상

4. 실험결과

4.1 천공착점 위치효과

굴착설계선으로부터 천공착점까지의 거리, 즉 천공착점의 위치는 기본적인 여굴량을 결정한다는 점에서 여굴량에 직접적인 관련이 있다. 암반등급 2,3 등급에 대한 실험결과 착점의 위치가 굴착설계선에 근접할수록 여굴량도 필연적으로 감소하기는 하지만 그에 따라 미굴부위의 수도 증가한다.

그림 11의 추세선에 나타난 바와 같이 굴착설계선으로부터 착점의 위치가 5cm 이내인 경우 실제 평균 여굴깊이는 20cm 이내에서 발생하고 미굴은 거의 발생하지 않지만, 굴착설계선에 천공착점을 설정한 경우에는 평균 여굴깊이는 약 13cm 정도로 감소하는 반면 미굴부위는 5개소(1개소는 터널 원주방향으로 약 35 ~ 40cm 길이)정도가 발생하는 것으로 나타났다.

이 결과를 근거로 여굴과 미굴을 동시에 최소화하기 위해서는, 여타 작업방법이 특별한 변화 없이 기존과 동일하다면, 굴착설계선으로부터 약 2-3cm 안쪽으로 천공착점을 일치시키는 것이 적절하다고 사료된다. 즉, 만약에 굴착설계선에 천공착점을 정확하게 일치시킨다면 부분적으로 약간의 미굴이 발생하기는 하지만 여굴은 허용기준치 이내에서 최소화시킬 수 있게 된다. 실제 실험시에는 발생된 미굴 부위를 Breaker 또는 점보드릴로 추가 절취를 하였지만 작업 Cycle에는 큰 영향이 없었다.

이러한 천공정확도를 유지하기 위해서는 천공작업자의 숙련도뿐 아니라 막장에 표시된 굴착선공의 정확도도 중요한 의미를 갖게 된다.

4.2 굴착선 표시 정밀도 효과

전단면으로 굴착되는 2, 3등급의 경우에는 막장을 좌우로 분할하여 마킹 빈도에 따른 표시의 정확성과 천공착점의 정확성을 측정하였고 상하 반단면으로 굴착되는 4, 5 등급에서는 마킹 유무에 따른 천공의 정확성을 측정하였다. 정확성의 기준으로는 굴착설계선에 대한 오차의 평균치 대신 표준편차를 적용하였는바 이것은 천공기사마다 굴착설계선을 참고로 개인의 판단에 따라 천공착점의 위치를 일률적으로 조절하기 때문에 평균치는 객관적이지 못하다고 사료되었기 때문이다.

그 결과 전단면에서는 표시 빈도가 증가할수록 굴착설계선의 정밀도가 양호해지고 천공착점의 오차도 작아지는 것으로 나타났다. 즉, 표시 빈도를 10회로 할 때보다 20회로 했을 경우 천공오차는 평균적으로 약 2-3cm가 감소하며 이를 비율로 환산시 10회일 때보다 46% 정도 정확도가 증가하는 것으로 나타났다.

4회의 실험이 실시된 반단면의 경우 굴착선 표시를 실시한 쪽이 그렇지 않은 쪽보다 대체로 천공정확성이 대체로 양호한 것으로 나타났다.

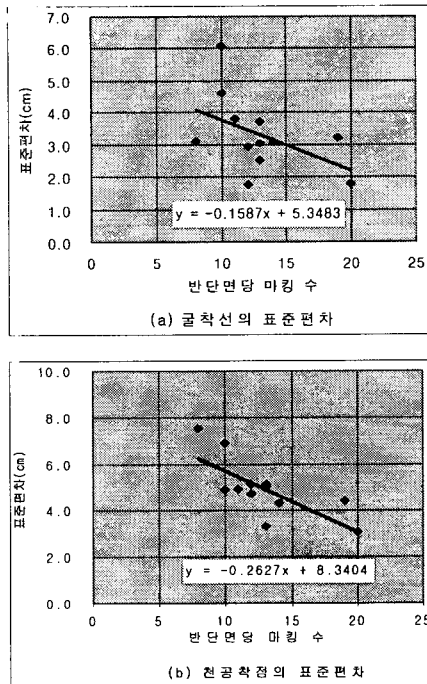


그림 12. 굴착선 표시 정밀도에 따른 굴착선 및 천공의 표준편차(전단면)

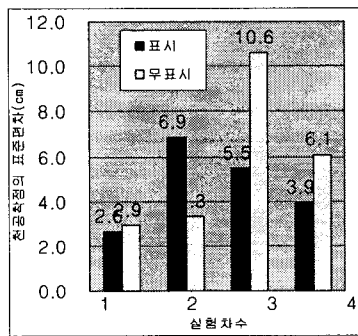


그림 13. 마킹유무에 따른 천공의 표준편차(반단면)

4.3 천공방법에 따른 천공각 변화

점보드릴을 중앙에 고정시킨 채 천공할 경우 일반적인 천공시 천공각은 평균 5.6°이었지만 천공기사가 천공각을 줄이고자 노력할 경우는 4.2°였다. 또한 점보드릴의 앞쪽만 좌측으로 이동하여 천공시는 평균 5.4°, 점보드릴 전체를 이동하여 천공시는

4.4°로 나타나 천공각을 줄이고자 하는 천공기사의 각별한 노력이 있다면 보통 천공시보다 약 1.4°, 특별한 노력 없이 장비 전체를 이동하는 것만으로 평균 1.2° 정도 천공각이 감소하는 것으로 나타났다. 이론적으로 천공각이 1° 감소함에 따라 3m천공시 천공저부에서 약 5cm정도의 여굴이 감소한다는 점을 고려할 때 천공기사가 각별한 노력을 하거나 또는 점보드릴 전체를 이동하므로써 천공저부에서 대체로 약 6-7cm정도의 여굴이 감소한다고 할 수 있다.

한편 이 세 가지 천공방법에 있어서 공통적인 것은 좌우측벽부 천공시보다 천단부 천공시 점차 천공각이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 장비자체의 작업 범위가 좌우측부 보다는 천단부 천공시 더 불리하고 천단부 천공시는 점보드릴의 붐대를 관찰하기가 상대적으로 불리하기 때문으로 파악된다.

B실험이 아직 진행 중이어서 상기 표에 나타난 평균값이 변화할 가능성도 있지만, 발파후 미굴발생 양상을 고려하여 천공각을 적절히 줄이고자 하는 노력만으로도 장비의 이동 없이 천공각을 만족할 만한 수준 내에서 유지할 수 있다는 점을 천공기사들과의 토론을 통해 확인 할 수 있었다.

표 5. 천공위치에 따른 평균 천공각 변화

		실험 횟수	1	2	3	평균	비고
중앙에서 천공시	일반적인 천공(A방법)		4.3	6.6	5.9	5.6	추가 실험중
	천공기사의 노력(B 방법)		4.2	-	-	4.2	
이동하여 천공시	장비의 앞쪽만 이동 (C 방법)		5.9	6.0	4.4	5.4	
	장비 전체이동 (D 방법)		4.4	4.2	4.7	4.4	

4.4 굴착선공의 적정 천공간격

현재 실험이 진행되고 있는 암반등급 1등급을 제외하고 이미 완료된 2-5등급에 대해서만 결과를 정리하였다. 여굴깊이는 굴착설계선부터 내공까지의 거리가 아닌 실제 굴착선공 위치로부터 내공까지의 거리를 기준으로 분석하였다.

(1) 암반등급 V

총 3회 실시한 결과 45cm전후의 공간격일 때 최저의 여굴량 발생하지만 65cm일 때와 큰 차이는 없었다. 그러나 기타 실험 결과 및 국내의 관련 자료를 참조할 때 약 50cm 전후가 적절한 공간격이라고 판단된다. 한편 발파후 상태를 육안으로 관찰한 결과 암질이 매우 취약한 상태인 5 등급에서는 무엇보다도 절리 발달상태가 여굴형성에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며 좀더 신뢰성 있는 결과 도출을 위해서는 추가적인 실험이 필요하다고 사료된다.

표 6. 굴착선공 공간격 실험결과(5 등급)

기준공간격 (cm)	45		55		65	
	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이
1	47	21	55	23	60	37
2	43	37	59	17	70	21
3	49	14	51	33	64	18
평균(cm)	46	24	55	24	65	25

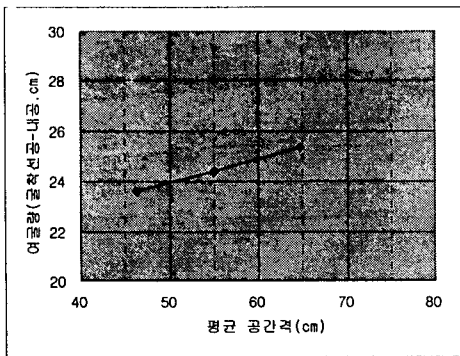


그림 14. 굴착선공 공간격 실험결과(5 등급)

(2) 암반등급 IV

총 4회 실험의 실험결과 50-55cm정도의 공간격일 때 최저의 여굴량 발생하였으며 4 등급의 암반에서도 절리의 영향이 상당히 큰 것으로 관찰되었다.

표 7. 굴착선공 공간격 실험결과(4 등급)

기준공간격 (cm)	50		60		70	
	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이
1	49	5	61	15	74	7
2	51	23	61	32	67	22
3	-	-	61	9	65	22
4	55	10	62	35	-	-
평균(cm)	52	13	61	23	69	16

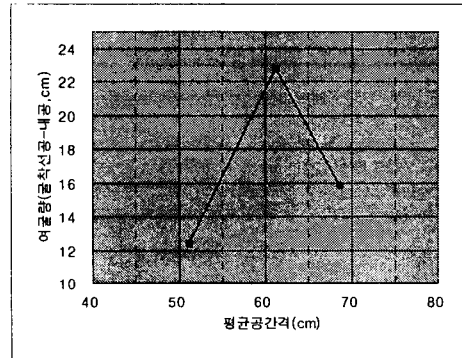


그림 15. 굴착선공 공간격 실험결과(4 등급)

(3) 암반등급 III

총 6회를 실시하였다. 그 중 Data가 정상적인 5회의 실험에 대한 분석결과 약 60-65cm정도의 공간격일 때 최저의 여굴량이 발생하는 것으로 나타났다.

표 8. 굴착선공 공간격 실험결과(3 등급)

기준공간격 (cm)	55		65		75	
	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이
1	49	16	60	33	72	23
2	58	18	62	12	72	18
3	52	27	61	13	73	19
4	54	11	66	14	74	16
5	56	27	64	17	76	15
평균(cm)	54	20	62	18	73	18

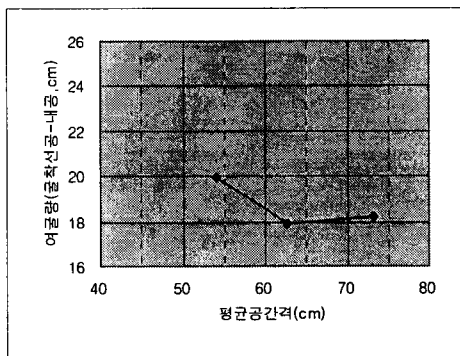


그림 16. 굴착선공 공간격 실험결과(3 등급)

(4) 암반등급 II

총 4회를 실시하였으며 공간격에 따른 여굴량의 변화가 매우 뚜렷하게 나타나고 있었다. 평균공간격 72cm일 때 최저 여굴이 발생하였다.

표 9. 굴착선공 공간격 실험결과(2 등급)

기준공간격 (cm)	55		65		75	
	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이	공 간격	여굴 깊이
1	55	43	68	23	72	1
2	52	24	64	26	73	5
3	57	18	67	15	72	8
4	56	3	65	11	-	-
평균(cm)	55	22	66	19	72	5

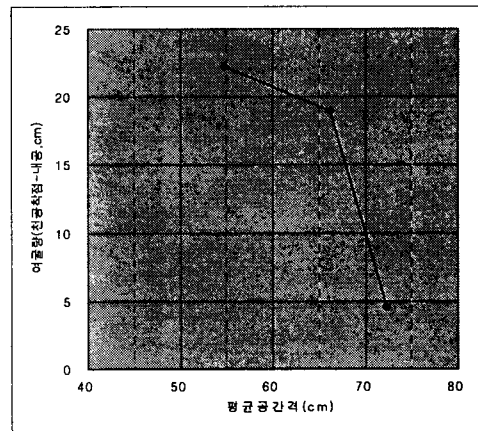


그림 17. 굴착선공 공간격 실험결과(2 등급)

(5) 결과 종합

각 암반등급별 적정 천공간격을 종합한 결과 암질이 저하할수록 여굴 최소화를 위한 적정 공간격도 감소하고 있었다. 대체로 암반등급이 1등급씩 향상됨에 따라 5-10cm정도 공간격을 증가시키는 것이 여굴저감 및 효율적인 발파를 위해 효과적이라 판단된다.

본 실험에서는 천공간격을 작업 여건을 고려하여

10cm단위로 변경하였으므로 실제 최적의 천공간격은 변화가 있을 수 있다. 따라서 본 실험에서 나타난 결과와 기존의 국내외 연구 및 시공사례를 고려할 때 여굴 최소화를 위한 굴착선공 적정 공간격은 표 10과 같이 설정하는 것이 적절하다고 판단된다.

표 10. 암반등급에 따른 적정 천공간격

암반등급 (RMR기준)	2	3	4	5
최소여굴 발생 공간격 (cm)	72	62	52	46
적정공간격 (cm)	70-75	60-65	55-50	50-45

이러한 패턴은 암종 및 암질에 따라 차이가 있을 수 있으므로 보다 신뢰성 있는 결과를 위해서는 향후 다양한 현장에서 추가적인 보완실험이 필요하며 이를 토대로 여굴저감을 위한 암반등급별 굴착선공의 적정 천공간격을 설정할 수 있으리라 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 천공시 여굴이 발생하는 작업과정을 크게 굴착선 표시, 천공착점 설정, 점보드릴 위치, 굴착선공 천공간격으로 구분하고 각 과정별 작업조건이 여굴에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

아직 실험이 진행중이고, 보완해야 할 사항도 있지만 지금까지 진행된 실험의 결과에 대한 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 천공착점의 위치는 여굴 및 미굴량의 크기와 직결된다. 따라서 천공착점의 위치를 결정하는 굴착선 표시작업시, 표시 위치를 2-3등급의 암반에서는 굴착설계선 2-3 cm 안쪽에 설정하는 것이 여굴 및 미굴의 저감을 위해 적절하다고 판단된다. 이때 굴착선공의 공간격도 암반등급에 따라 본 논문에서 제시된 결과를 기준으로 적절히 조절하면 여굴 및

미굴의 발생을 더욱 억제할 수 있다고 사료된다.

2) 천공착점의 설정은 표시된 굴착선을 기준으로 이루어지므로 굴착선의 정밀도, 즉, 표시 굴착선과 실제 굴착설계선과의 오차가 클수록 천공착점의 오차도 비례하는 것으로 나타났다. 이것은 발파후 여굴 및 미굴 발생도 증가할 수 있음을 의미한다. 따라서 굴착선을 표시할 때 굴착선 표시지점의 빈도를 증가시켜 가능한 오차를 줄이는 것이 천공 정확도를 증가시키는데 유리하다.

3) 천공각을 줄이기 위해 1차적으로 터널규모에 적합한 점보드릴의 선정이 바람직하다. 천공각이 과도하게 발생하는 경우 점보드릴을 좌우측으로 이동시켜 천공해도 좋지만 무엇보다도 천공기사의 세심한 작업 및 이를 해결하기 위한 지속적인 노력이 있으면 천공각은 상당수준 감소시킬 수 있다. 또한 천공시 천공각을 천공기사가 즉시 파악한다면 천공각을 줄이는데 큰 도움을 줄 수 있으므로 천공각 표시 장치를 부착하여 사용하거나 컴퓨터가 장착된 점보드릴 사용을 권장한다.

4) 암질상태에 따라 굴착선공의 공간격을 변화시키는 것이 여굴저감에 효과적이며 암질이 양호할수록 공간격을 RMR을 기준으로 한 등급당 5 - 10cm 정도씩 증가하는 것이 바람직하다.

5) 부분적으로 발생한 미굴을 가급적 제거하고자 한다면 막장 부석정리시 Breaker를 이용하거나 후속 천공작업시 점보드릴을 이용하여 절취하더라도 작업시간에는 큰 지장이 없는 것으로 분석되므로 미굴을 방지하기 위해 인위적으로 천공착점을 굴착설계선으로부터 상당한 외측에 설정하거나 천공각을 과도하게 설정하는 것은 불합리한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이상돈, 김낙영, 2001, 여굴 최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구, 제18회 도로기술 연구성과 발표회 논문집, 한국도로공사, pp.71-109.
2. 김성욱, 1999, 터널 천공발파시 여굴원인 및 대책, 도로공사 실패사례집, 한국도로공사, pp.391-394.
3. 이태노, 김동현, 서영화, 2002, 터널 굴착면 여굴 최소화를 위한 발파암 분류(안) 및 공법 개발 연구, 대한화약발파공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 25-38.
4. George Kubica, 1998, The Modern Technique of Rock Blasting for Tunnels, 두산건설, pp.1-73.
5. Pusch, R., Stanfors, R., 1992, The Zone of Disturbance around Blasted Tunnels at Depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29, No. 5, pp.447-456.