

노치굴착장비 개발과 터널 여굴제어 및 미진동 암굴착공법에 관한 연구

정동호, 문상조, 안대진, 정원준 ((주)유신코퍼레이션)

김은관 ((주)선산토건)

김동규 (한국건설기술연구원)

1. 서론

최근 도심지를 통과하는 고속철도 및 일반철도, 지하철 건설이 늘어나면서 터널굴착시 발생하는 진동 및 소음으로 인한 피해가 늘고 있다. 이로 인해 설계단계에서 민원발생을 억제하고자 유압 등을 이용한 기계식 굴착공법의 적용되고 있으나 이러한 기계식 굴착공법은 경암반에 적용될 경우 시공성 저하에 따른 공기의 증가로 경제성이 매우 떨어지는 단점이 발생한다. 우리나라의 지질은 대체로 화강암과 편마암등의 경암반으로 이루어져 있어 시공현장에서는 새로운 공법의 출현을 기대하고 있는 실정이다.

국내·외 연구에 의하면 노치 발파공을 이용할 경우 노치첨단부에서의 응력집중효과로 인해 균열개시응력이 일반 원형발파공에 비해 크게 줄어들어 적은 화약량으로도 충분히 균열을 발생시킬 수 있음이 밝혀졌다. Dally&Fourney에 의하면 $\phi 50\text{mm}$ 의 발파공에서 5mm 길이의 노치를 주었을 경우 1mm의 노치가 있을 때보다 균열발생압력이 약 50% 감소함을 보였다. Ouchterlony는 발파공 벽면에 있는 균열의 길이에 대해 균열개시압력을 조사하였는데 노치부의 응력집중으로 인해 균열개시압력이 감소될 뿐 아니라 다른 벽면에서 균열이 생성되는 것을 억제한다고 하였다. 백승규 등은 수치해석을 이용하여 노치발파공에서의 균열발생 특성에 관해 연구하였는데, 노치의 폭과 깊이가 깊을수록 균열전파가 용이하지만 적절한 노치의 형상은 노치성형 기술에 따른 것이라 하였다.

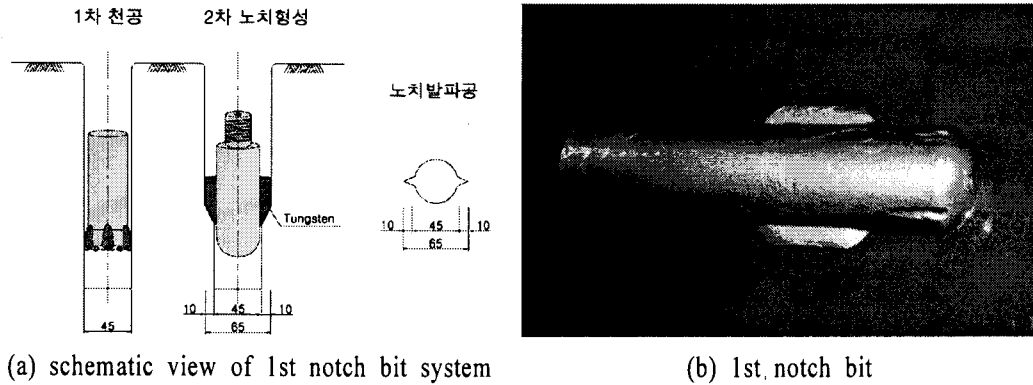
노치공은 천공이 번거로워 적용에 어려움이 있어 노치공 적용을 위해선 천공메카니즘과 장비 개발이 필요한 실정이다. 또한 현재까지 노치공에 관한 연구는 블록실험과 같은 실내시험에 그치고 있어 현장 적용성에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 효율적인 천공메카니즘을 개발하고 비트 천공시험을 반복하여 최적화 된 비트형상 개발에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 노치공을 이용한 미진동 암굴착공법을 개발하여 현장에 적용, 진동전파와 여굴제어 효과를 일반발파공법과 비교하여 그 적정성을 평가하였다.

2. 노치굴착장비의 개발

2.1 노치공 천공 메카니즘

일반적으로 터널 발파공의 천공은 회전력과 충격력을 복합적으로 가하여 이루어진다. 그런데 노치공을 성형하기 위해선 타격만을 이용해야하기 때문에 이를 제어할 별도의 장비

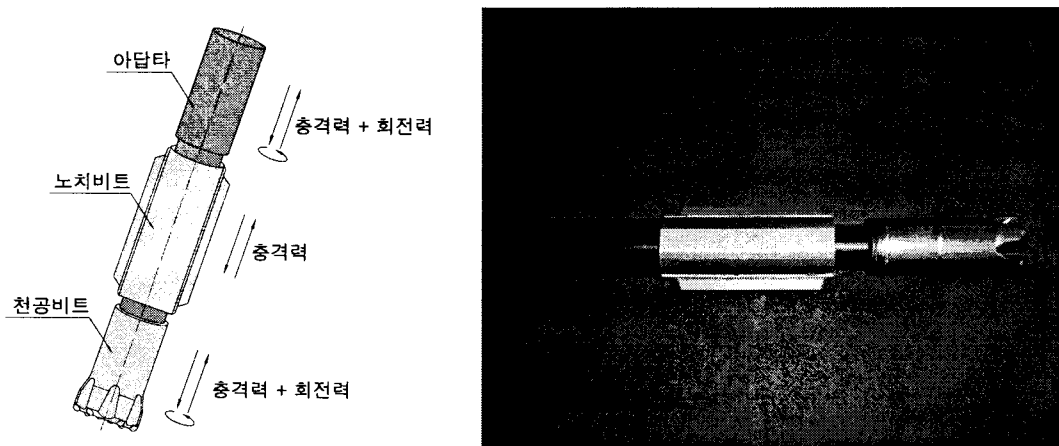
제작이 필요하다. 1차 노치비트시스템에서는 Fig. 1과 같이 일반비트로 원형발파공을 천공한 후 노치가 달린 특수비트를 재장착하여 노치공을 성형하였다. 이 경우 노치공 성형에 2공정이 발생되어 기존공법에 비하여 약 2배의 천공시간이 소요되는 문제가 있었다.



(a) schematic view of 1st notch bit system (b) 1st notch bit

Fig. 1 First notch bit system

1차 노치비트 시스템의 2공정 시공을 1공정으로 간소화하기 위해 Fig. 2와 같은 2차노치비트시스템을 개발하였다. 이 모델은 일반천공비트, 노치비트, 노치아답타로 이루어지며 천공비트는 기존공법과 같이 회전력과 충격력으로 원형의 발파공을 천공하며, 노치비트는 노치아답타에 의해 회전력이 제어되어 충격력으로 노치를 성형한다.



(a) schematic view of 2nd notch bit system (b) 2nd notch bit

Fig. 2 Second notch bit system

완성된 노치비트시스템의 천공효율성 확인을 위해 신공항철도 ○○현장에서 실험 측정을 실시하였다. 본 구간의 암질은 화강암질 편마암으로써 일축압축강도 135 MPa, RMR 65~80의 대체로 양호한 편이다. 천공패턴은 천공장 1.0m, 1.5m, 2.0m 로 나누었고, 천공시간 측정은 천공장비 Setting후 실천공시간만을 측정하였으며, 각 천공장별 10회 측정하여 산술평균하였다. 천공장비는 점보드릴(TomRock Power Class) 2 Boom이고, 천공경은 \varnothing 45mm이다. 실험측정결과는 Table. 1과 같으며 1차 노치비트 시스템에서는 천공시간이 기존공법에 비해 1.6배의 시간이 더 걸려 시공성이 불리하나 2차 노치비트 시스템에서는 기존공법에서와 거의 비슷한 시간을 유지할 수 있음이 확인되었다.

Table 1. Comparison of boring time on hole length and bit type

| 천공장 | 천공시간 | | |
|-------|---------------|---------------|---------------|
| | 일반비트 천공 | 1차 노치비트 시스템 | 2차 노치비트 시스템 |
| 1.0 m | 10분, 0초/분 | 10분, 1분 30초/분 | 10분, 0분 59초/분 |
| 1.5 m | 10분, 1분 22초/분 | 10분, 2분 15초/분 | 10분, 1분 25초/분 |
| 2.0 m | 10분, 1분 51초/분 | 10분, 2분 42초/분 | 10분, 1분 53초/분 |

2.2 노치비트 형상의 최적화

노치비트는 원형공을 확대천공하는 역할을 수행하므로 그 형상에 따라 천공 효율성이 크게 달라질 것으로 판단하였다. 따라서 Fig. 3과 같이 노치의 높이(H), 각도(θ), 길이(L)를 변화시켜 노치성형의 용이성, 노치홈의 직진성, 비트 마모율의 최소화 등에 중점을 두고 test 비트를 제작하여 반복 실험을 수행하여 형상을 최적화 하였다.

가) 노치의 높이(H) 및 각도(θ)

Dally&Fourney(1977)의 연구에 따르면 균열발생 압력이 노치의 높이가 약 10mm 이내에서는 급격히 감소하나 10mm 이상이 되면 감소정도가 완만해 짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 노치의 높이를 5, 8, 10, 15mm로 하여 test 비트를 제작하고 천공실험을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같으며 5mm의 경우 노치홈이 거의 만들어지지 않았고 15mm의 경우 천공저항이 커 천공소요시간이 오래 걸렸으며 인발시 비트의 파손이 빈번히 발생하였다. 따라서 노치의 높이를 10mm 내외로 함이 적정한 것으로 판단되었다.

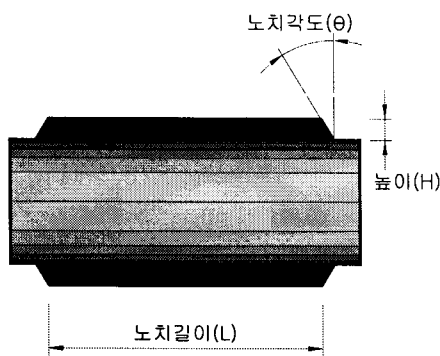


Fig. 3 Notch bit

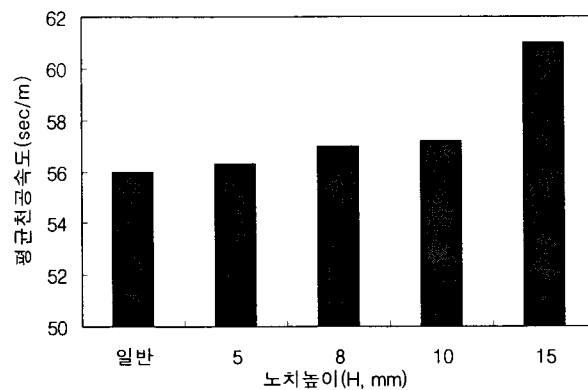


Fig. 4 Average boring time according to notch tip heights

노치의 각도는 45°전후로 30°, 70°의 3가지 종류의 테스트를 실시하였다. 70°의 경우에는 상대적으로 30°, 45°에 비하여 노치팁이 작아서 가이드가 노치의 방향을 유지하는데 불리하였다. 30°의 경우에는 천공시 저항을 많이 받아 마모율이 크고, 천공속도도 증가했다. 따라서 천공속도, 마모율, 노치의 방향성을 고려하여 노치팁 각도를 45°로 선정하였다.

나) 노치길이 선정(L)

노치비트의 길이는 노치 홈의 직진성에 가장 중요한 영향을 준다. 노치공 천공시 노치비트의 길이가 짧으면 회전력의 영향을 많이 받아 노치 홈이 직선으로 유지되기 어려워 노

치효과를 발휘할 수가 없고, 반대로 비트길이가 필요이상으로 길면 직진성은 유지되나 천공시 저항이 커져 굴진속도가 떨어지고 후퇴시 걸림 저항이 커져 비트 훼손을 증가시키는 경향이 있을 것으로 판단되었다. 또한, 암반의 강도에 따라서도 비트의 길이에 영향을 줄 것으로 생각되었다. 따라서 노치비트의 길이를 5, 10, 15cm로 test비트를 제작하여 천공실험을 하였다. 실험결과 3가지 비트 모두 천공관입 시작 후 노치의 방향이 비뚤어지는 현상은 없었다. 하지만, 비트길이가 5cm의 경우 막장면이 울퉁불퉁한 관계로 비트 초기 관입 전에 계획된 방향을 상실해 버려 의도한 노치공을 천공할 수 없었고, 최소한 노치길이가 10cm정도 되어야 계획된 방향의 노치 홈을 형성할 수 있었다.

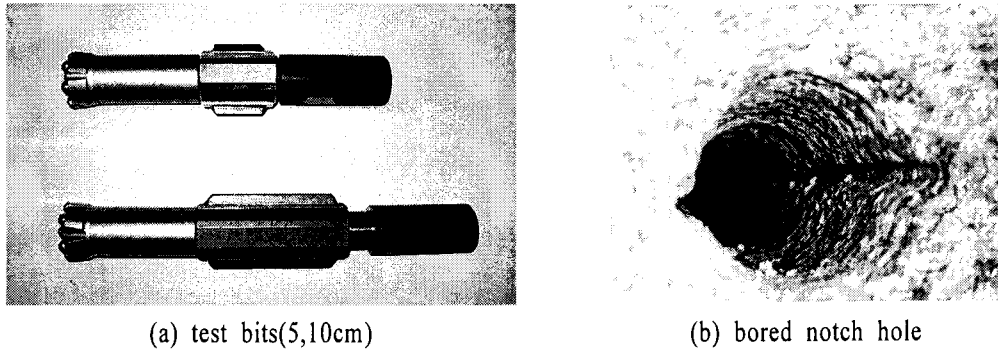


Fig. 5 Test bits and a bored notch hole

다) 노치모양 선정

노치비트의 노치길이가 실험에 의해 노치길이는 5, 10, 15cm 중 10cm 정도가 적당하나 천공 후 후퇴시 노치면의 슬러지 적체로 인한 저항이 커서 노치 팁의 파괴가 종종 발생하는 경향이 있었다. 이를 개선하기 위하여 저항을 적게 받도록 Fig. 6과 같이 노치모양을 변화시켜 천공실험을 실시하였다.

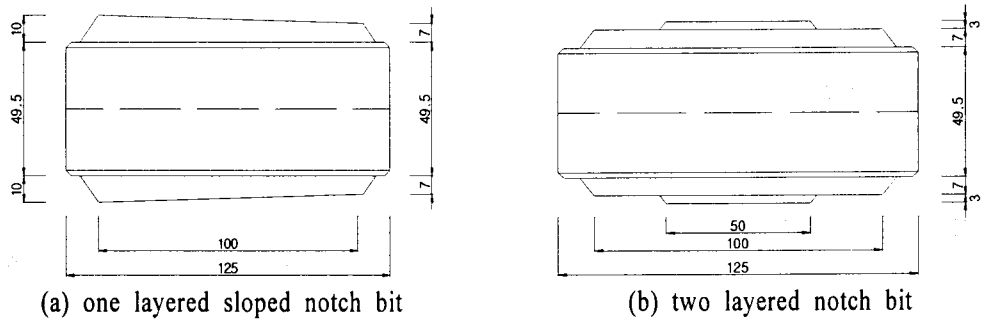


Fig. 6 One layered sloped notch bit and two layered notch bit

1단 경사 노치비트의 노치형성 천공속도는 기존 1단 경사가 없는 노치비트와 동일하였으나, 천공 후 인발시 걸림 저항이 다소 해소되어 시공성이 개선되었다. 하지만, 노치비트를 양쪽으로 사용하지 못하고 한쪽만 사용해야하므로 비트의 수명이 반으로 단축되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 기존 노치길이가 5cm 비트의 인발시 걸림 저항이 없음을 감안하여 중앙부 5cm 노치를 형성한 후 좌 우측에 2.5cm의 노치를 형성하는 2단 노치비트를 개발하였다. 이 2단 노치비트를 개발함으로써 기존 노치비트의 결함을 보완할 수 있었다.

2.3 노치아답타

노치아답타는 Fig. 7(a)와 같이 노치비트에 회전력을 제어하고 충격력만을 전달하기 위한 장치이다. 초기에는 노치아답타와 노치비트 접촉부에 지속적인 충격과 회전력제어로 인한 마찰열로 파손이 발생하는 등 내구성이 떨어지며, 슬러지 끼임 현상이 발생하는 문제점이 있었다. 이를 개선하고자 베어링 등을 장착하였으나 베어링이 충격력을 견디지 못하고 파손되는 현상이 발생하였다. 기계전문가의 자문을 받아 물의 수막현상이 이를 개선할 수 있음을 밝혀냈고 Fig. 7(b)와 같이 노치아답타-노치비트 접촉부에 출수구를 두어 문제를 해결하였다.

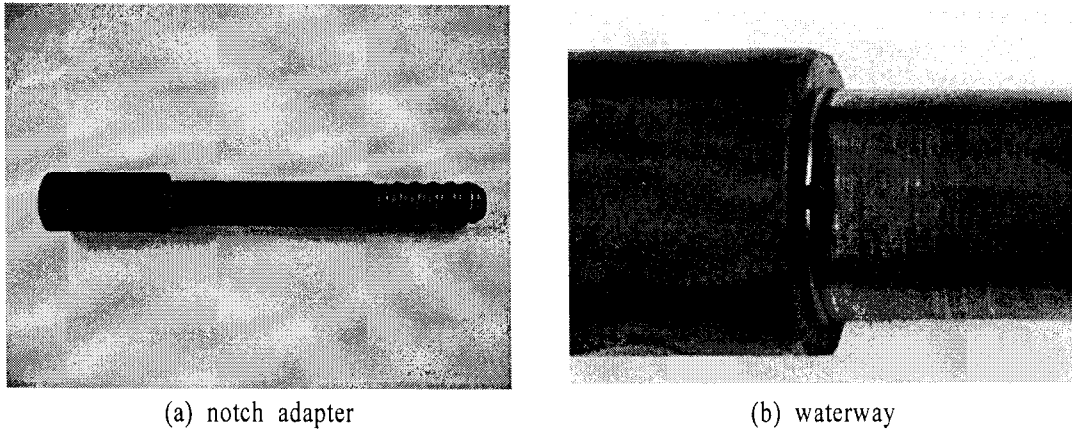


Fig. 7 Notch adapter

2.4 노치가이드

노치가이드는 노치비트의 방향을 제어하여 원하는 방향으로 노치가 성형될 수 있도록 하기 위한 장치이다. 노치 가이드는 Fig. 8(a)와 같이 기존 점보드릴 헤드부의 U부에 장착할 수 있도록 약 8kg으로 크기와 무게를 줄였고, Fig 8(b)와 같이 Bushing부와 스프링을 장착하여 마찰과 충격에 의한 가이드 마모를 줄여 내구성을 확보하였다.

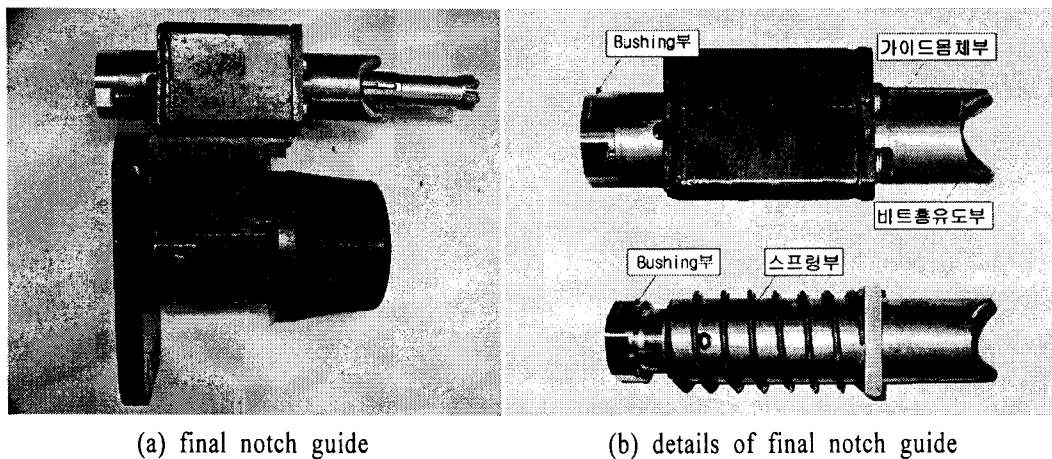


Fig. 8 Final notch guide and details

3. 현장시험 및 결과

3.1 현장현황

본 현장은 인천국제공항철도 2단계 토목공사 현장의 본선터널 굴착공사 중 도심지 통과 구간(약 171m)으로 Fig. 9와 같이 인접 구조물들의 안정성 문제로 유압절개 굴착공법으로 설계되었던 구간이다. 그런데 본 구간의 현장지질조사 결과 지질조건이 화강암질 편마암류로 일축압축강도가 130~150MPa에 이르는 경암으로 판명되어 시공성 저하에 따른 공기 증가로 유압절개 굴착공법의 적용이 어려운 구간이었다. 이에 Fig. 10과 같이 미진동 암굴착공법을 적용하여 진동과 여굴을 제어하였다.

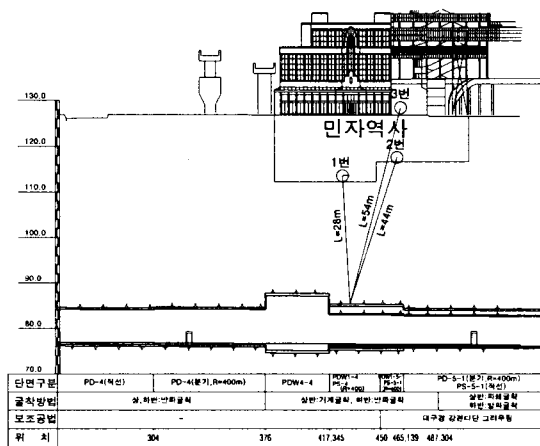


Fig. 9 Conditions on the site

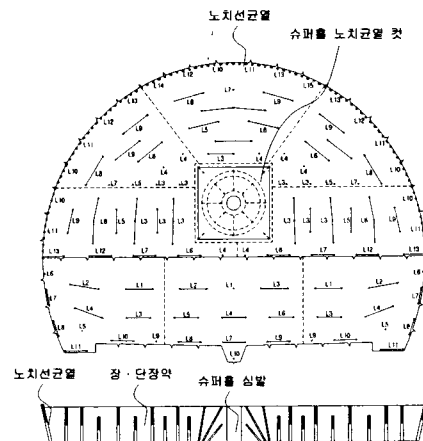


Fig. 10 Pre-splitting notch excavation

3.2 미진동 암굴착공법의 적용

본 연구에서는 일반발파공법, 선균열노치발파공법, 미진동암굴착공법 비교를 위해 일반 발파공법을 5회, 선균열노치발파공법 1~15회, 미진동암굴착공법 1~15회에 총 35회의 굴착 시공을 수행하였다. 매회 2~3지점에서 발생한 진동치와 여굴량을 계측하여 분석을 실시하였다. 여기서 선균열노치발파공법이란 최외곽굴착선공부에만 노치발파공을 적용한 공법이다.

진동치 계측을 위해 사용된 계측기기는 변위, 속도, 가속도, 주파수, 폭풍압을 모두 측정할 수 있는 것으로 Instantel사 DS-677이다. 계측위치는 터널 진행방향과 직각으로 각각 35개의 데이터를 계측하였으며 회귀분석결과와 Fig. 11과 같다. 분석결과 Fig. 11에 보듯이 선균열노치발파공법 적용시 일반발파공법에서보다 약 30% 이상, 미진동암굴착공법 적용시는 약 50%의 진동저감효과가 있음이 확인되었다.

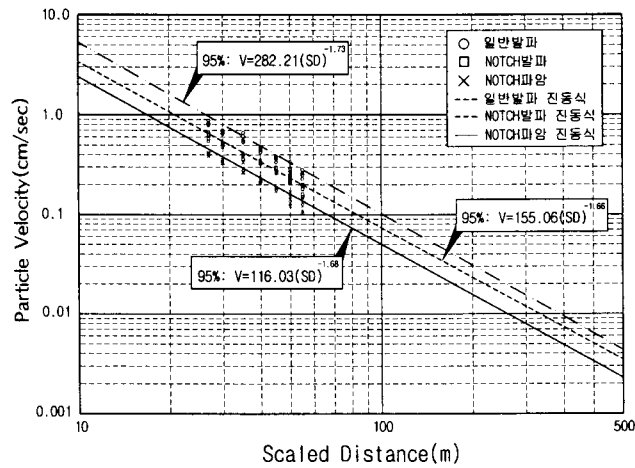


Fig. 11 Regression result of vibration

터널내 여굴은 SET2010 장비를 사용하여 Table. 2와 같은 방법으로 측정하였다. 그 결과는 Table. 3과 같이 일반발파를 시행하였을 경우는 천단부에서는 약 16cm, 측벽부에서는 약 11cm, 노치공법을 이용하였을 경우는 천단부 10cm, 측벽부 11cm이 발생하였다. 측벽부에 발생하는 여굴은 일반발파나 노치공법 적용시나 큰 차이가 발생하지 않았지만 천단부에서는 약 6cm가 줄어 1/3정도 감소하였다. 노치 선균열 발파의 적용으로 여굴 감소 뿐만 아니라 암반손상대의 축소도 기대할 수 있으며 이는 영구 구조물로서 터널의 안정성에 기여할 것으로 판단된다.

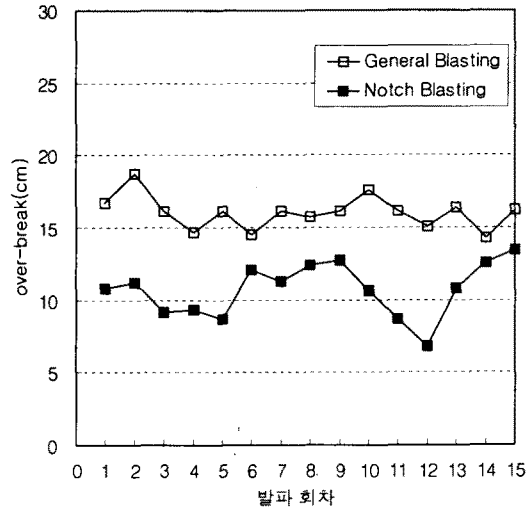
Table. 2 Sample of Measuring result of over-break after Noctch-blasting

| 측점 | X (m) | Y (m) | 여굴(cm) | 여굴측정 개요도 |
|----|--------|---------|--------|----------|
| 1 | -6.020 | 125.387 | 10.6 | |
| 2 | -5.814 | 126.945 | 9.7 | |
| 3 | -5.213 | 128.397 | 10.6 | |
| 4 | -4.256 | 129.644 | 11.6 | |
| 5 | -3.010 | 130.601 | 10.6 | |
| 6 | -1.558 | 131.202 | 12.7 | |
| 7 | 0 | 131.407 | 11.2 | |
| 8 | +1.558 | 131.202 | 12.1 | |
| 9 | +3.010 | 130.609 | 12.1 | |
| 10 | +4.256 | 129.644 | 10.6 | |
| 11 | +5.213 | 128.397 | 10.5 | |
| 12 | +5.814 | 126.945 | 11.1 | |
| 13 | +6.020 | 125.387 | 8.8 | |
| 평균 | | | 10.94 | |

Table. 3 Result of measuring overbreak

(units: cm)

| 회차 | General Blasting | | Notch Blasting | |
|----|------------------|-------|----------------|-------|
| | Roof | Wall | Roof | Wall |
| 1 | 16.7 | 11.7 | 10.8 | 12.1 |
| 2 | 18.7 | 12.5 | 11.2 | 12.5 |
| 3 | 16.1 | 12.1 | 9.2 | 11.1 |
| 4 | 14.7 | 13.6 | 9.3 | 9.7 |
| 5 | 16.1 | 11.3 | 8.7 | 8.7 |
| 6 | 14.5 | 10.6 | 12.1 | 12.5 |
| 7 | 16.1 | 9.7 | 11.3 | 10.6 |
| 8 | 15.7 | 12.3 | 12.4 | 9.2 |
| 9 | 16.1 | 12.4 | 12.7 | 10.3 |
| 10 | 17.6 | 8.6 | 10.6 | 9.2 |
| 11 | 16.1 | 9.7 | 8.7 | 11.5 |
| 12 | 15.1 | 10.7 | 6.8 | 13.2 |
| 13 | 16.4 | 13.2 | 10.8 | 10.9 |
| 14 | 14.3 | 11.7 | 12.6 | 13.2 |
| 15 | 16.2 | 13.6 | 13.5 | 11.1 |
| 평균 | 16.03 | 11.58 | 10.71 | 11.05 |



4. 결론

노치공 발파에 관한 현재까지의 연구는 노치효과의 입증에 집중되어 전산시뮬레이션, 모형실험에 의한 연구가 주류를 이루고 있었다. 본 연구에서는 선균열 노치발파공법을 터널 설계 및 시공에 적용 가능하도록 하기 위해서 노치비트시스템 장비를 개발하고 합리적인 발파패턴 설계를 목표로 하고 있다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 천공비트, 노치비트, 아답타, 가이드로 구성된 노치비트시스템을 개발하여 노치공 천공 시간을 기존 원형발파공 천공 시간과 다름없는 수준으로 단축하였다.

- 노치효과를 충분히 발휘할 수 있고, 비트의 파손 및 마모정도를 최소화 할 수 있도록 노치비트의 높이, 각도, 길이 등 형상을 최적화였다.

- 슬러지 제거와 가이드 파손의 최소화를 위해 가이드 본체에는 용수철을, 후미에는 Bushing을 두어 내구성 및 경제성을 확보하였다.

- 실제 터널 시공현장에 선균열 노치발파공법, 미진동 암굴착공법을 적용하여 일반발파공법과 비교하였다. 그 결과 선균열 노치발파공법 적용시 약 30%, 미진동 암굴착공법 적용시 약 50%의 진동 감소 효과를 보였다.

- 터널 굴착시공부에 노치를 적용하였을 시 여굴은 기존공법에 비해 약 1/3 정도 줄일 수 있었으며 여굴 감소에 따라 암반손상영역이 축소되어 영구 구조물로서 터널 안정성에도 기여 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설핵심기술연구개발사업 현장기술지원 자유공모과제('06~'09) “발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 및 시공기술 개발”의 연구결과의 일부이며, 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국도로공사 도로연구소, 2000, 여굴최소화를 위한 최적발파패턴 설계방안에 관한 연구, 106p.
2. Giorgio Berta, 1990, Explosives : An Engineering Tool, Italesplosive-Milano, 79-108.
3. Olofsson, S., O., 1990, Applied Explosives Technology For Construction And Mining, 181-196.
4. Per-Anders Persson, Roger Hølemberg And Jaimin Lee, 1994, Rock Blasting And Explosives engineering, 265-285.
5. Tada, H., Paris, P., And Irwin, G., 1973, The Stress Analysis of Crack Handbook, 1.1-1.6, 19.3.
6. Rooke, D., P., And Cartwright, D., J., 1976, Compendium of Stress Intensity Factors, 160-161.
7. USA. National Highway Institute, 1991, Explosives Engineering, Rock Blasting And OverBreak Control, 415p.
8. Dally, J., W., And Fourny, W., L., 1997, Fracture Control in Construction Blasting, Proc. 18th U.S. Symp. on Rock Mechanics, 2A6-1~2A6-7.
9. Fourny, W., L., Dally, J., W., And Holloway, D., C., 1978, Controlled Blasting with Ligamented Charge Holders, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geometh. Abstr. Vol. 15, 121-129
10. 터널 암굴착 굴착선공부 선균열 발파공법, 특허 제0362014호, 공법설명서, 특허청