

점보 드릴을 이용한 터널굴착의 시공성 평가 Efficiency of Tunnel Excavation Using Jumbo Drill

김승조¹⁾, Seung-Jo Kim, 김철근²⁾, Chul-Keun Kim, 김현식³⁾, Hyun-Sik Kim, 이병식⁴⁾, Byung-Sik Lee

¹⁾ 홍익기술단 도로부 차장, Deputy General Manager, Hong Ik Engineering Co.

²⁾ 홍익기술단 도로부 이사, Director, Hong Ik Engineering Co.

³⁾ 신경건설 국내토목부 과장, Manager, Sun Kyung Construction Co.

⁴⁾ 공주대학교 건설환경공학부 전임강사, Full Time Instructor, Kongju National University

SYNOPSIS : Efficiency of tunnel excavation using the jumbo drill is evaluated using the field data. To evaluate the efficiency, variations of excavation and overbreak quantities for different drilling patterns are related with rock qualities represented by rock mass rating(RMR). The drilling patterns consist of the number of drill hole, and the geometry and depth of drill holes. Among effects of these patterns on excavation, the effect of the number of drill hole is mainly considered. On the basis of the observed relationships, it is intended to suggest the most appropriate drilling pattern for various rock qualities resulting the smallest amount of overbreak. In addition to this investigation, the construction time required for a unit advance of excavation is also investigated when the jumbodril is used. From the result, the standard advance rate and the efficiency of the drilling equipment are evaluated, respectively.

KEYWORDS : Tunnel excavation, Jumbodril, Efficiency of tunnel excavation, Overbreak, Advance rate

1. 서 론

천공과 발파에 의한 터널 굴착 공정에서 발파효율의 극대화, 전석잔류의 최소화, 비산거리의 감소, 여굴발생의 억제, 효율적 버럭처리 등의 문제는 터널 굴착의 경제적인 시공을 위해 필수적으로 고려되어야 할 사항이다. 이러한 목적을 위해 굴착작업은 굴착대상 암체의 조건과 굴착장비의 종류에 따라 천공 및 발파 형식을 적절히 선정하여 시공하여야 한다. 특히 NATM 공법을 이용한 효과적인 터널시공을 위해서는 굴착시 주변 암반의 손상을 최소로 하여야 하므로 이를 위해서도 정확한 천공 및 발파시공은 필수적이다. 이러한 목적의 일환으로 본 현장에서는 점보드릴 (3 분 2 게이지)을 도입하여 발파를 위한 천공작업에서 정확성과 신속성을 확보코자 하였다.

점보 드릴을 이용한 터널굴착을 위해 당초 설계에서 적용한 천공 및 발파계획에서는 굴착대상 암체를 RMR 값에 따라 다섯 가지의 조건으로 분류하고 각 조건별로 상이한 천공형식을 적용토록 하였다. 천공형식에서는 각 형식별로 일률적인 천공수, 천공장, 천공각도 등이 규정되었다. 그러나, 시공관리시 각 굴진 단계에서 요구되는 굴진장의 확보와 여굴발생 최소화의 결과를 얻기 위해서는 규정된 천공형식을 현장조건에 따라 수정해 적용해야 할 것으로 판단되는 경우가 많았다. 그럼에도 불구하고 천공계획의 변경방법 뿐만 아니라 천공계획의 변경이 요구됨에 대한 판단 자체도 적절한 규정에 의하기보다는 막장

관찰에 의거한 현장기술자들의 주관적 경험에 의존할 수밖에 없어 시공결과와 효율성과 경제성의 사전 평가가 어려웠다. 이는 동류의 시공조건에 대해 정리된 과거 시공자료의 부재로 인한 것으로 향후의 효율적 터널시공을 위해서는 가치 있는 객관적 시공자료의 지속적인 축적이 요구됨을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 당 현장의 터널 시공시 실측한 시공자료를 정리 분석하여 당 현장에서의 효율적인 시공을 위해서 뿐 만 아니라, 향후 점보 드릴을 이용한 천공 및 발파 계획의 수립에 참고할 수 있는 자료로 제안코자 하였다. 이러한 목적으로 각 굴진 단계에서 적용된 천공유형과 굴착량, 여굴량, 작업시간, RMR 등이 실측되었으며, 실측 시공자료로부터 천공유형에 따른 굴진율의 변화를 조사함으로써 점보드릴을 이용한 터널 굴착의 효율성을 평가코자 시도하였다.

2. 시공개요 및 실측 시공자료

2.1 현장개요

조사대상 현장은 NATM공법으로 시공되고 있는 내공단면의 최대폭원 10.389 m, 총높이 6.73 m의 쌍굴로서 연장은 상·하행선 각 840 m 이고 현재까지 상·하행선 각 200 m의 굴진장까지 굴착이 완료된 상태이다. 터널구간에 분포하는 암종은 응회암질 사암과 역암으로 구성되었으며 천공 및 발파계획과 지보패턴은 암반분류에 의해 설정된 암질의 등급에 따라 적용토록 규정되어 있다. 암질의 등급은 암체의 RMR에 따라 극경암, 경암, 보통암, 연암, 풍화암의 다섯 종류로 분류되었다. 실제 시공시 상행선에 대하여 조사된 굴착대상 암체의 암종과 암상을 굴진 거리에 따라 정리하면 표 1 과 같다.

표 1. 굴진 거리별 암체의 강도조건 (상행선)

굴진 거리 (m)	암종	암상	RMR
6	역암	풍화암	20 미만
6~ 15	역암	연암	21 ~40
15~27	역암, 사암	보통암	41~60
27~97	사암	경암	61~80
97~	사암	극경암	80 이상

위의 표에서 알 수 있는 바와 같이 굴착대상 암체의 암질은 터널 입구부 6 m 이후부터는 매우 양호하여 굴착에 좋은 조건이다. 따라서 터널굴착은 굴진장 15 m까지는 반단면 굴착공법에 의해 시공되었고, 그 이후의 굴진에서는 전단면 굴착공법으로 시공되었다.

2.2 실측 시공자료

본 논문에서 사용하는 자료는 1997년 9월 5일 까지 시공된 상행선 150 m까지의 굴진장에 대한 자료이다. 150 m의 굴진장에 대해 각 굴진 단계별로 천공수, 천공장, 뇌관수, 화약량, 굴착시간, 굴착량, 여굴량, 배럭처리시간, 원석 및 부석 처리시간, RMR 등의 값이 실측되었다. 천공유형에 있어서 천공각도 또한 중요한 변수의 하나로 고려될수 있다. 그러나, 실제로 현장에서 시공된 천공각도는 V-Cut 공법에 의한 암반 굴착에 적절한 각도를 유지할 수 있도록 경험적으로 조절시공되어 각 천공의 각도를 실측하기가 상당히 어려웠으며 시행된 실측 결과 또한 신뢰도가 매우 낮은 상태이다. 따라서 천공각도는 결과분석을 위한 변수에서 제외키로 하였다.

3. 시공자료 분석

조사된 자료를 다음의 두 가지 목적으로 분석하였다. 첫째로 천공조건과 암체의 암상에 따른 굴착효율을 평가하여 최적 천공유형을 모색한다. 천공조건으로는 천공수를 고려하고 암체의 조건은 RMR을 기준으로 하였다. 둘째로 실측된 단위굴진거리의 시공에 소요되는 시간으로부터 3분 점보드릴을 이용한 터널굴착의 굴진율(m/분)을 조사하여 점보드릴을 이용한 터널굴착의 시공효율을 평가한다.

3.1 굴착효율

일반적으로 굴진율은 굴착량과 여굴량에 의해 좌우된다고 볼 수 있다. 과도한 굴착은 여굴량을 증가시켜 슛크리트 소요수량의 증가, 터널의 구조적 안정성의 저감, 작업시간 증가 등의 결과를 초래한다. 반대로 과소한 굴착은 굴진장을 확보하기 위한 추가굴착작업을 필요로 하여 굴진속도를 역시 감소시킨다. 이와 같은 문제들은 궁극적으로는 터널시공의 경제성을 저감시키는 요인이 된다. 결과적으로 굴진속도의 향상을 위해서는 터널의 계획 굴착량에 가장 근접한 굴착량을 얻을 수 있는 천공 및 발파를 실시함으로써 여굴이 최소화되는 굴착이 이루어져야 한다. 그러므로 굴진율로 정상화 되는 터널굴착의 효율성은 여러 가지 천공조건, 암체의 조건에 따라 발생하는 굴착량과 여굴량의 변화를 조사함으로써 추정할 수 있다고 보았다.

3.1.1 자료의 신뢰도

자료를 분석하기에 앞서서 얻어진 자료의 신뢰도를 평가하기 위해 각 굴진단계에서 측정된 단위 굴진거리당의 굴착량과 여굴량의 변화를 그림 1.a 와 1.b에 각각 나타냈다. 그림에 나타낸 단위굴착량은 터널의 각 굴진단계에서 시공완료시 현장에서 반출된 전체 암석량의 자연상태 수량을 굴진거리로 나눈 값이다. 여굴량은 발파 굴착 후 발생한 여굴면들을 직접 실측하여 체적으로 환산한 값을 굴진거리로 나눈 값으로 역시 자연상태의 수량이다. 이론적으로 여굴을 제외한 굴착량은 터널단면에 대한 계획 굴착 수량과 일치하여야 하므로 그림 1.a 와 1.b로부터 이를 조사하여 자료의 신뢰도를 평가하기로 하였다.

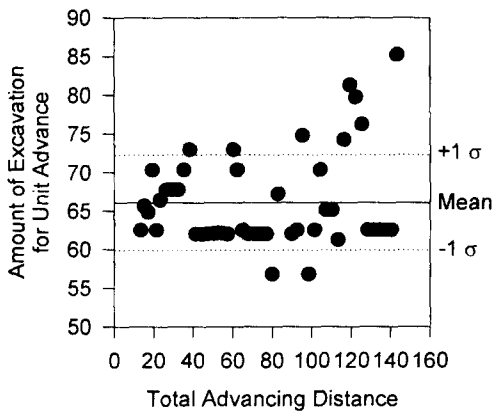


그림 1.a 굴진거리별 단위굴착량의 변화

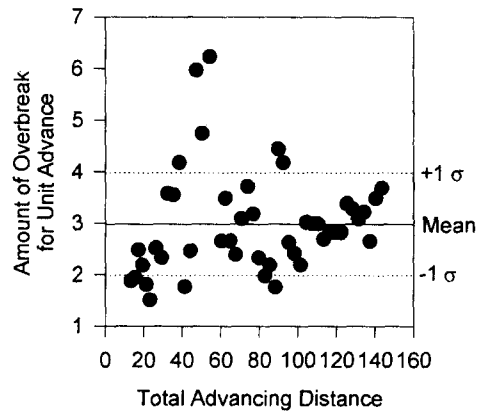


그림 1.b 굴진거리별 단위여굴량의 변화

본 현장의 시공에서는 그림 1.b에서 보는 바와 같이 소량이라 할지라도 모든 굴진단계에서 여굴이 발생하였으며 추가굴착이 요구되는 과소굴착의 경우는 거의 발생하지 않았다. 이는 발파굴착의 시공 관리시 각 굴진단계의 굴착 및 발파공정에서 굴착공의 위치와 개수, 화약량 등을 적절히 조절하여 소량의 여굴이 발생할지라도 추가발파가 요구되는 경우의 발생을 피했기 때문이다. 그림 1.a에서 구해진 평균 단위굴착량이 약 $66 \text{ m}^3/\text{m}$ 였고, 그림 1.b에서 구해진 평균 단위여굴량은 약 2.9 m^3 로 단위굴진거리당 여굴을 제외한 단위굴착량의 평균은 $63.1 \text{ m}^3/\text{m}$ 로 추정할 수 있었다. 한편 단위굴진거리당 터널단면의 계획굴착수량은 약 $67 \text{ m}^3/\text{m}$ 로서 이는 그림 1.a와 1.b로부터 추정된 단위 굴착량

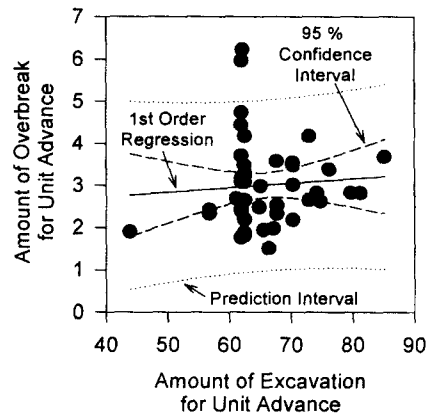


그림 2. 단위굴착량에 대한 단위여굴량의 변화

63.1 m³/m 와 약 4 m³/m 의 오차가 있다. 그러나, 현장자료 수집의 난이도 등을 고려할 때 수집된 자료는 본 논문의 조사 목적으로 어느 정도 신빙성 있는 자료로서 받아들일 수 있다고 보았다.

또한 여굴량의 실측치에 대한 신뢰도는 그림 2 에 보인 바와 같은 단위굴착량과 단위여굴량의 관계를 이용하여서도 평가할 수 있다. 실측된 단위굴착량은 여굴량을 포함하고 있으므로 이론적으로 단위여굴량은 단위굴착량이 증가함에 따라 증가하여야 한다. 그림 2 의 결과는 이러한 추세를 잘 나타내고 있으며 이는 실측된 여굴량의 신뢰도를 또한 입증한다.

3.1.2 단위천공수의 변화가 굴착효율에 미치는 영향

위 절에서 살펴본 바와 같이 과소한 굴착의 경우가 발생한 굴착단계는 없으므로 천공조건에 따른 굴착효율은 각 굴진단계에서 단위천공수에 따른 단위여굴량의 변화를 조사함으로써 평가될 수 있다고 보았으며 이 관계를 그림 3 에 나타냈다. 또한 이 그림에 나타낸 관계에 대하여 2차 함수 회귀분석을 실시하고 그 결과를 같은 그림에 나타냈다. 여기서 단위천공수는 각 굴진단계에서 적용한 전체 천공수를 터널입면의 계획 단면적으로 나눈 값으로 보았다. 그림 3 에 나타낸 회귀분석의 결과에 따르면 여굴량은 천공수가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보인다. 그러나 천공수가 과다하게 증가되어 단위면적당 천공수가 약 3.5 공/m² 보다 커지면 여굴량이 증가될 가능성을 보인다.

참고로 천공조건에 따른 굴착량의 변화를 조사하기 위해 각 굴진단계에서 단위천공수에 대한 단위굴착량의 변화를 이 관계의 2 차 함수 회귀분석 결과와 함께 그림 4 에 보였다. 그림의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 굴착량은 단위천공수 2.8 공/m² 부근에서 최대가 되고 과소하거나 과다한 천공의 경우 굴착량이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 앞서 설명한 바와 같이 굴착량의 증가가 굴진속도의 증진을 의미하는 것은 아니라는 것을 염두에 두어야 한다. 굴진속도의 증진을 위해서는 굴착은 설계굴착과 가장 유사하게 실시되어 여굴을 최소화하는 것이 바람직하다.

3.1.3 천공깊이가 굴착효율에 미치는 영향

천공깊이에 따른 여굴량의 관계를 조사하기 위하여 실측자료를 검토한 결과 거의 모든 굴진단계에서 유사한 천공깊이를 적용한 것으로 나타났다. 따라서 이는 분석자료로서의 의미가 없으므로 천공깊이의 영향에 대한 조사는 실시하지 않기로 하였다.

3.1.4 암상에 따른 굴착효율

굴착대상 암체의 암상이 굴착효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 RMR에 따른 단위여굴량의 변화를 이 관계의 2차 함수 회귀분석 결과와 함께 그림 5에 나타냈다.

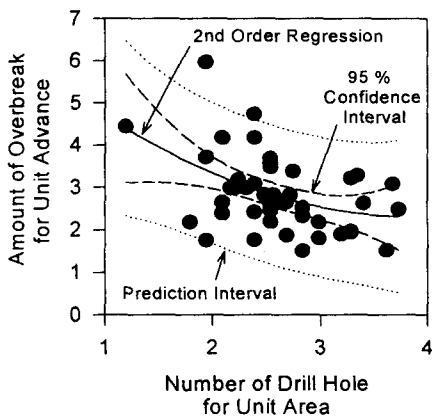


그림 3. 단위천공수의 변화에 따른 단위여굴량의 변화

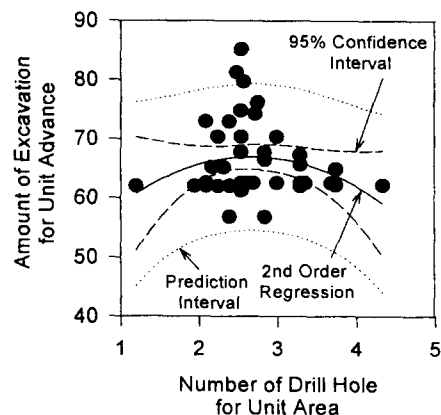


그림 4. 단위천공수의 변화에 따른 단위굴착량의 변화

그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 RMR이 증가함에 따라 여굴의 발생가능성이 커진다고 할 수 있어 천공 및 발파에 주의를 요함을 알 수 있다.

암체의 암체에 대하여 최소의 여굴이 발생하는 시공을 위해 적용해야 하는 천공수를 추정하기 위해서는 그림 5 에 나타낸 RMR과 단위여굴량의 관계가 그림 3 에 나타낸 단위천공수와 단위여굴량의 관계와 함께 분석되어야 한다. 따라서 이들의 관계를 삼차원의 관계로 그림 6 과 같이 나타냈다. 그림에 나타낸 3 차원 그물의 자료는 그림 3 과 5 에 나타낸 관계를 이용하여 2 차 함수 보간법으로 얻어진 결과이다. 그러나, 그림 3 과 5 의 결과에서 추정된 경향들, 즉 RMR이 증가함에 따라 여굴량이 증가하고 천공수의 증가에 따라서는 감소했다가 증가하는 추세를 그림 6 의 결과에서는 명확하게 찾아 볼 수 없다. 이는 분석에 사용한 자료의 도수 부족으로 인한 것으로 판단되며 향후 당 현장에서서의 지속적인 자료수집을 통해 더 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있으리라 기대한다.

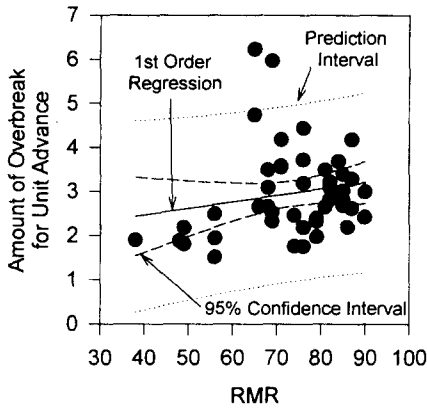


그림 5. 암체의 RMR 값에 대한 단위여굴량의 변화

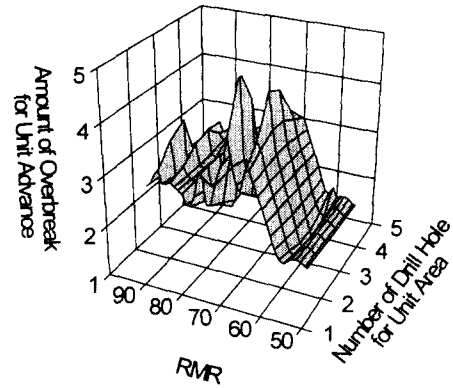


그림 6. 암체의 RMR 값과 단위천공수에 대한 단위여굴량의 변화

3.2 점보드릴을 이용한 터널굴착의 시공성 평가

점보드릴을 이용한 터널굴착의 시공성 평가의 일환으로 단위 굴진거리의 굴착시공에 소요되는 작업시간, 즉 굴진율 (m/분) 을 실측치로부터 추정하여 보았다. 여기에서 굴진에 소요되는 작업시간은 터널의

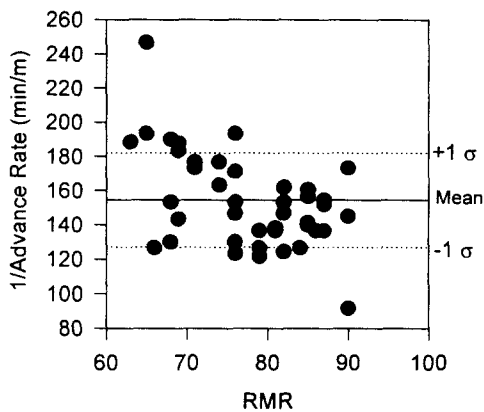


그림 7. 암체의 RMR 값에 따른 굴진율의 역수의 변화

단위굴진거리를 시공하기 위해 소요되는 전체 시간으로서 천공시간, 버럭처리시간과 전석 및 부석의 처리시간의 합계로 보았다. 현장 실측결과 점보드릴을 이용한 천공작업에는 평균적으로 1 분/ 3 공 · m의 시간이 소요되는 것으로 조사되었다. 각 단계별 천공소요시간은 천공수로부터 계산한 순 천공작업시간을 고려하였다. 이러한 방법으로 산정한 굴착대상 암체의 RMR 값에 대한 굴진율의 역수의 관계를 그림 7 에 나타냈다.

그림 7 의 결과에 의하면 점보드릴을 이용한 터널굴착의 굴진율은 평균 1/155 m/분으로 조사되었으며 RMR에 따른 굴진율의 변화는 그리 크지 않음을 예상할 수 있다. 즉 RMR의 변화에 따른 여굴량의 변화가 미소하여 전반적인 굴착소요시간에는 큰 영향을 미치지 않았다고 보여진다.

4. 결론

3 붐 2 게이지 점보드릴을 이용한 NATM 공법의 터널 굴착에 있어 적용된 천공유형의 변화에 따른 굴진효과의 조사를 실시하고 굴착시공의 굴진율을 평가하였다. 그 결과 터널의 굴진율을 증진하기 위해서는 여굴의 발생을 최소화하는 것이 가장 중요하며 여굴의 양은 천공수가 증가할수록 암체의 RMR 값이 감소할수록 감소하는 경향을 보인다는 결론을 얻었다. 당 현장에서의 암상 조건에 대하여 여굴량을 최소로 할 수 있는 천공수는 약 3 공/m²로 조사되었으며, 점보드릴을 이용한 터널굴착의 굴진율은 약 1/155 m/분으로 조사되었다.

그러나 전반적으로 본 논문에서 얻어진 결과는 분석자료의 도수 부족으로 인하여 그 신뢰도가 매우 낮다고 평가되며 현 단계에서는 실무에 응용될 수 있는 결과로 보이지는 않는다. 다만 현장의 기술자들로 하여금 체계화된 시공자료 축적의 중요성을 일깨우고 의식부족으로 인하여 시공자료의 축적에 무관심한 현 상황의 개선에 일익을 담당하는 데 의의를 두고자 한다. 당 현장은 당 터널의 완공시까지 지속적으로 시공자료를 축적하여 더욱 신뢰성 높은 결과를 도출할 계획이다.

5. 참고문헌

1. ××건설주식회사(1996), ×× - ×× 간 도로확장 및 포장공사 ×× 터널 설계검토보고서.
2. ××지방국토관리청(1995), ×× - ×× 간 도로확장 및 포장공사 실시설계보고서.
2. Bickel, J. O., Kuessel, T. R., and King, E. H. (1996), Tunnel Engineering Handbook, Chapman and Hall, New York, pp.122~152.