

천공데이터를 활용한 정량적 암반특성 평가와 발파설계 적용방안

김광염¹⁾ · 김창용¹⁾ · 장수호¹⁾ · 서경원²⁾ · 이승도³⁾

1. 서 론

최근 수십km에 달하는 장대터널들이 설계 시공되면서 급속 시공 및 급속 안정화 터널 시공의 중요성이 더욱 커지고 있는 실정이다. TBM과 같은 기계화 장비의 발전으로 인해 기계화 터널 굴착이 점차 늘어나고 있는 추세이지만 아직까지 천공-발파에 기초한 NATM 시공이 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 터널 시공 중 붕괴/붕락 사고가 최근까지도 계속 발생하고 있는 실정에서 발파굴착 대상 암반에 대한 정량적 평가와 이에 기초한 발파설계에 대한 필요성이 지속적으로 요구되고 있다.

발파를 위해 필수적으로 진행되는 천공작업은 터널 시공 사이클타임에서도 가장 큰 비율을 차지할 뿐만 아니라 굴착 대상인 막장면에 대한 특성을 정량적으로 평가할 수 있음이 많은 연구를 통해 알려져 왔다. 하지만 이러한 천공데이터를 통한 막장을 정량적으로 평가하기 위해서는 다양한 특성을 가지는 암반에 대한 상당한 양의 축적된 데이터베이스의 확보가 선행되어야 한다. 몇몇 선진국에서는 각기 자국 암반에 적용 가능한 천공데이터 분석시스템을 개발하여 현장에 적용함으로써 DB를 구축하고 있으나, 국내에서는 아직 독자적인 천공데이터 획득 및 분석 시스템이 없는 실정이다. 본 논문에서는 천공 데이터를 이용한 막장 평가 기술과 국내 실정에 맞는 천공 데이터 분석 시스템의 개발 내용을 소개하고자 한다.

2. 천공데이터를 통한 막장 평가 기술

신속·정량화 평가법중 천공 데이터를 이용한 막장전방 탐사기술은 그림 1의 개요도처럼 점보드릴에 유압센서 및 데이터 레코더를 부착하여 천공시의 피드압, 회전압, 타격압을 측정함으로써 막장전방의 지반상태를 사전에 예측하고 이를 지보패턴 등에 피드백하여 공사의

1) 한국건설기술연구원 국토지반연구부

2) 광해방지사업단 산지복원팀

3) 삼성물산 토목기술팀

효율성을 증대시키고 시공 중 안전성을 향상시키기 위한 기술이다. 이전의 연구사례에 의하면 개별 천공 데이터들이 암질과 밀접한 상관성이 있지만 천공능력을 대표하는 값인 천공에너지를 암질판단의 기준으로 사용할 수 있으며 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$E_d(J/m^2) = (E_p \times C_p \times K) / (V_d \times A) \quad (1)$$

여기서 E_p : 타격에너지, C_p : 타격수, K : 손실계수, V_d : 회전속도(cm/min)

$$E_p(\text{천공에너지}) = A_p \times P_s \times P_p \times 9.8(J/kg \cdot m) \quad (2)$$

여기서 A_p : 피스톤 수압면적(cm^2), P_s : 피스톤 스트로크(m), P_p :타격압(kgf/cm^2)

천공탐사에서는 탐사장이 길어질 경우에는 로드와 지반의 마찰과 로드 자중에 의한 저항을 극복하기 위해 특수 제작된 로드가 사용되기도 한다.

최근에는 천공속도 등을 이용한 지반정수의 평가 및 전방 지반구조의 예측뿐만 아니라 데이터를 축적하여 지보패턴의 변경, 화약소비량의 추정을 통해 적극적으로 시공공정에 피드백 시키고 있다. 천공작업은 NATM 개념 굴착방식 중 장약 및 록볼트 시공을 위해 필수적으로 수행되는 작업공정이며 동일막장에서도 다수로 시행되고 있으므로 이에 수반되는 데이터를 이용하여 현장에서 신속히 지반을 평가하고 예측하는 기술의 개발은 매우 실용성이 높은 것으로 판단된다. 국내의 천공 데이터를 이용한 탐사기술은 기초적인 적용단계에 머물러 있다. 국내·외의 천공데이터 활용관련 현황을 간단히 정리하였다.

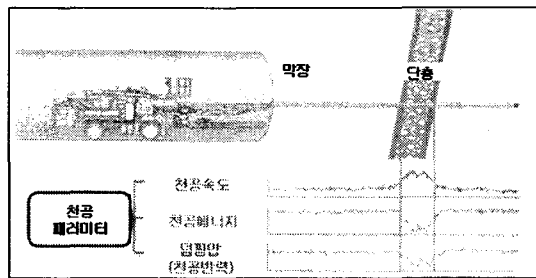


그림 1. 천공데이터 분석 개념도

국내에서 적용한 사례로는 현장에서 천공작업에 널리 사용되고 있는 점보드릴을 이용하여, 지보패턴분류에 기초적인 자료로 활용하기 위해 천공패러미터들인 지보패턴별 평균비트마모율을 조사하였고, 막장전방암반에 대한 천공속도, 타격압, 회전압을 측정하였다(김낙영 외, 2001). 측정된 결과와 막장지질조사결과를 비교분석한 결과는 천공데이터 값들의 변동이 전방의 파쇄정도에 파악하였다. 이는 단순한 천공데이터 값의 변동만으로 파쇄대의 추측은 가능하나 정확한 막장전방의 예측 및 지반판정에는 미흡하다.

Thuro(1997, 2003)는 천공 데이터들의 인자인 천공속도와 비트마모율을 이용하여 천공용이도(drillability)에 대한 개념을 제안하고(그림 2) 이러한 개념을 이용하여 그림 3과 같은 암종이 단일종인 지역과 다양한 지역에서의 천공용이도에 대한 암반의 분류를 제시하였으며, 굴착용이도(excavatability)의 제안을 통해 천공속도와 상관성이 있는 변형에너지와 체적당 화약소비량에 대한 관계를 연구하였다(그림 4, 그림 5).

Kahraman(2000)은 암반의 특성들로부터 천공속도를 정확히 예측 할 수 있는 천공용이도 지수(drillability index)를 제안하였으며, 암반의 특성들과 관계를 제시하였다(그림 6).

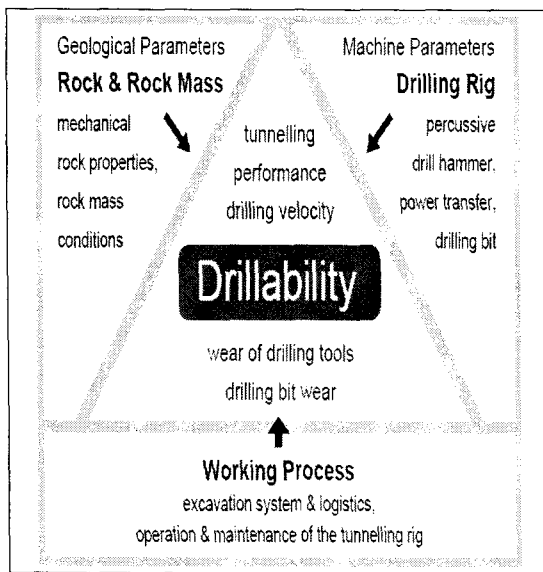


그림 2. 천공용이도 개념도

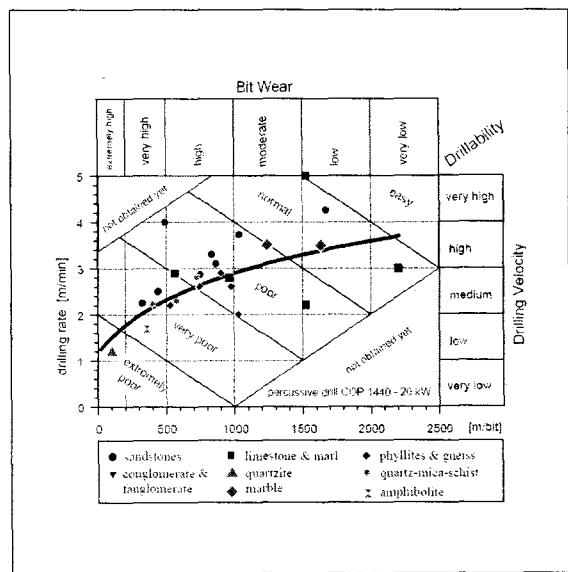


그림 3. 천공 데이터를 이용한 암반분류 예

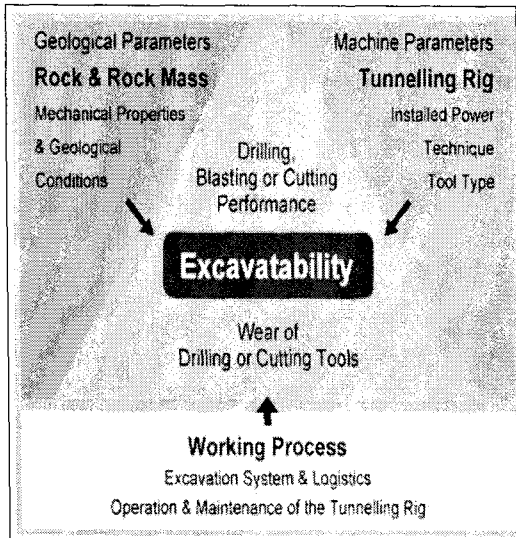


그림 4. 굴착용이도 개념도

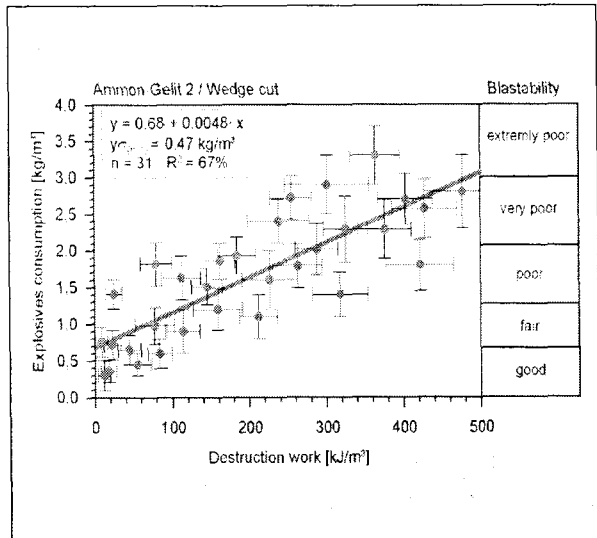


그림 5. 천공에너지와 발파용이도

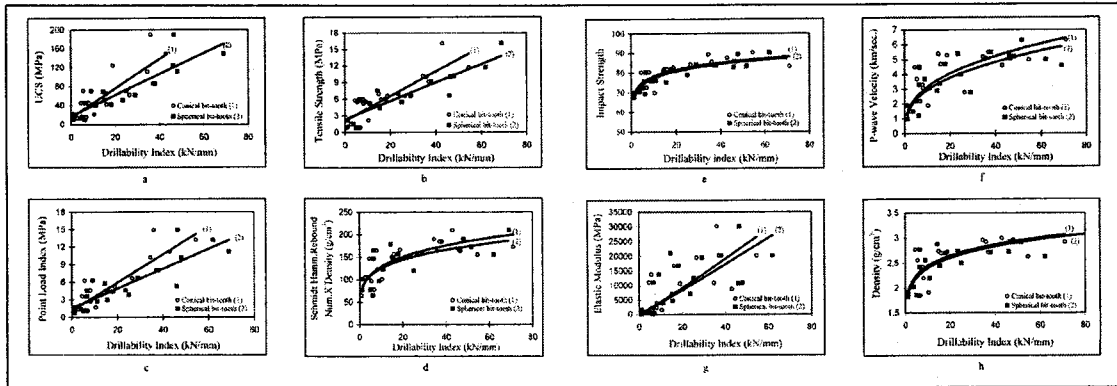


그림 6. 천공용이도 지수와 암반 특성과의 관계

천공 데이터를 가장 활발히 활용하고 있는 일본에서는 천공 데이터를 이용한 분석 시스템을 시공사이클 중 막장전방탐사에 추가하여 막대한 양의 천공데이터를 신속하고, 효율적이며, 정량적으로 이용하여 막장전방을 예측하기 위한 많은 연구 및 개발이 진행 중이다.

일본의 Toda 건설(2005)은 유압식 착암기의 천공데이터를 수집하고 얻어진 데이터로부터 천공구간의 지반성상을 평가하는 시스템인 '산악터널 막장전방천공검사시스템(DRISS)'를 개발하였다. 천공데이터들 중 천공속도, 천공에너지, 회전압을 이용하여 막장전방의 연약대/파쇄대의 예측만 가능할 뿐 천공데이터를 통한 정량적인 자료분석 및 개발이 필요하다. 그림 7과 그림 8은 막장전방탐사에 추가하여 록볼트공, 발파공과 같은 시공 사이클에 포함된 막대한 양의 천공데이터를 효율적으로 처리하고, 시스템 전체를 자동화시키기 위해 개발된 천공 데이터 분석시스템이다(Mutsuisumito건설, 2005). 천공 데이터들 중 천공에너지의 변화폭을 분석하여 막장전방의 지질변화를 예측 하였으며, 실시공 패턴과의 관계를 분석하였다. 또한 천공에너지는 실시공보패턴과 막장평가점에서 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타냈다(그림 9, 그림 10). 이러한 연구 결과는 막장전방의 지반성상을 정량적으로 예측할 수 있으며, 기 시공구간의 지반안정평가 및 지보패턴을 판정하는데 활용 되어질 수 있다.

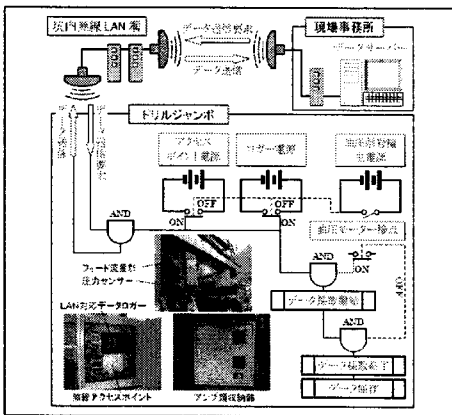


그림 7. 천공검층 시스템의 개요도

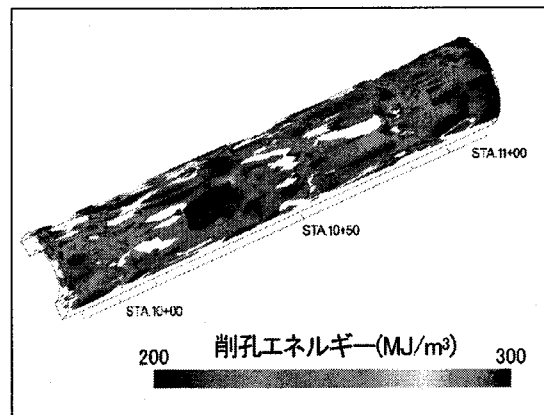


그림 8. 터널주변 지반의 평가

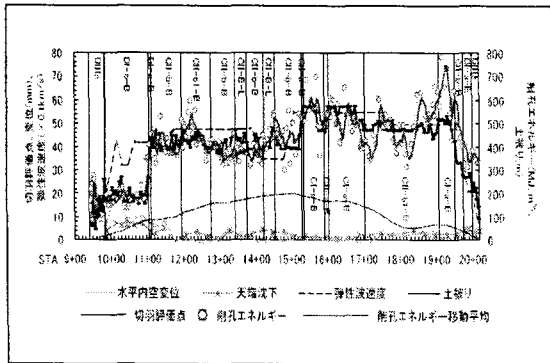


그림 9. 천공에너지와 실시공패턴의 관계

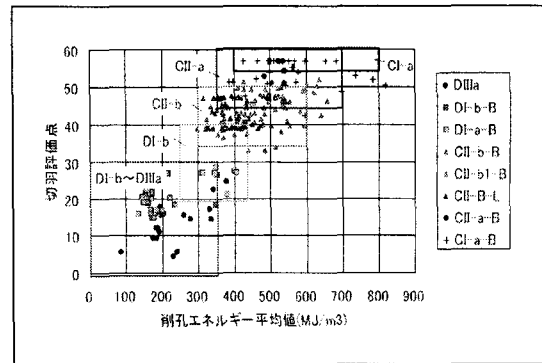


그림 10. 천공에너지와 막장평가점의 관계

3. 한국형 DDAS 시스템 개발

발파에 영향을 미치는 암반의 특성에 대한 연구는 국내·외에서 다양하게 수행되어 왔다. 암반의 역학적 특성(압축강도, 탄성과 속도 등)과 같은 하나의 인자와 비장약량과의 관계에 대한 규명연구로부터 RMR과 같은 복합요인들과 발파설계인자의 관계에 대한 연구도 지속적으로 수행되어 왔다. 하지만, 매 발파시 마다 이러한 암반의 역학적 특성들에 대한 평가과정(실내시험, 현장시험, 막장조사 등)이 정밀하게 수행하고 이를 통한 발파설계의 반영과정은 공기지연을 초래할 뿐만 아니라 막장 전체를 하나의 시험결과만으로 평가하여 발파설계를 한다는 것은 불확실하고 부정확한 평가를 초래할 수 있다는 문제가 있다.

앞서 언급하였듯이 NATM 터널 굴착 공정 중 천공작업은 발파 및 록볼트 설치 등을 위한 필수공정이며 하나의 단면에서도 100공 이상의 천공작업이 수행되어진다. 천공작업시 생성되는 데이터는 막장 전방에 대한 지반의 정량적 데이터를 내재하고 있으므로 이를 활용하는 기술은 작업공정에 영향을 주지 않고 실시간으로 분석되기 때문에 신속·정량적인 평가가 가능하다. 따라서 이러한 천공데이터와 발파설계인자와의 분석을 통한 평가시스템이 개발되어 질 수 있다면 공기를 저해하지 않으며 하나의 막장에서 변화하는 암반특성을 고려한 발파설계가 가능할 것이다.

현재 본 연구에서는 이러한 목적으로 DDAS(Drilling Data Assessment System)의 개발을 진행 중이다. 본 연구에서 구축하려는 신속·정량화 지반평가 시스템인 DDAS는 다음 그림과 같이 신속정량화 지반평가 데이터의 전송모듈과 분석소프트웨어, 현장자료의 DB모듈로 구성되어 있다. 그림 11은 본 연구에서 개발 중인 DDAS의 개요를 나타내고 있다.

이중 신속·정량화 지반평가 데이터의 분석모듈은 터널막장에 수행되는 천공데이터의 수집 및 정보처리 기능을 담당하는 모듈이며, 현장자료의 DB 모듈은 천공데이터와 지반정수의 상관관계, 지보패턴, 발파 인자 등을 데이터베이스화 하는 모듈이며 본 연구의 key parameter가 되는 부분이다. 분석 소프트웨어는 구축된 데이터베이스와 현재의 지반상태를 비교 분석하는 모듈이다.

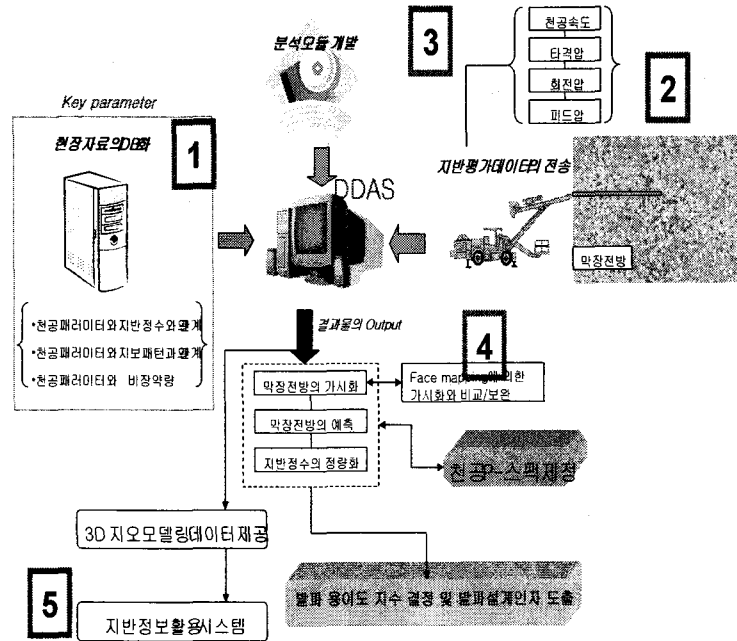


그림 11. DDAS 운영 모식도

4. DDAS 시스템을 이용한 발파설계

국외 연구를 통해 나타났듯이 천공에너지와 같은 천공 데이터는 발파설계가 핵심이 되는 비장약량과 상관관계가 높은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 DDAS를 통해 대상 암반의 천공용이도를 결정하고 이를 통해 발파용이도를 결정하는 것을 목표로 하고 있다. 터널 막장면에 천공된 다수의 장약공들에 대한 이러한 정보들은 3차원 공간상의 정보로 DB화 하고 가시화 하여 암반의 3차원적인 특성변화에 따른 적절한 발파설계에 도움을 주고자 한다. 또한 발파 결과를 확인하는 가장 많이 사용되고 있는 파쇄입도 분석과 HCF(half cast factor)와 같은 발파 효율을 정밀하게 측정하기 위하여 디지털 이미지 입체화 기법을 적용할 예정이다. 그림 12는 시공 중 터널 막장면에 대한 3차원 디지털 모델을 구성한 예이다.

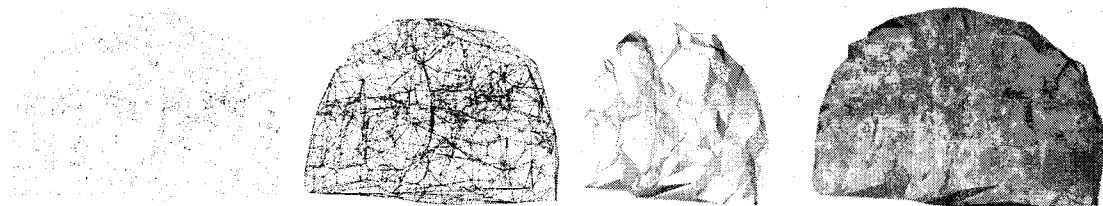


그림 12. 터널 막장면 3차원 디지털 모델(OO터널)

5. 결 론

본 논문에서는 천공 작업에 관련된 정보를 획득하고 분석할 수 있는 시스템 개발과 관련된 국내·외 사례 및 연구 진행 과정을 소개하고자 하였다. 본 연구에서 개발하고자 하는 천공데이터 분석 시스템은 터널 막장에서 수행되는 천공데이터의 수집 및 정보처리 기능, 천공 정보의 3차원 가시화를 위한 막장면 3차원 이미지시스템을 포함하고 있다. 또한, 천공 장비에서 획득된 데이터를 분석하여 현장에서 신속하게 암반을 평가하고 이를 기초로 발파 용이도 지수를 산출함으로써 기존의 엔지니어의 숙련도와 설계에만 의존했던 발파설계의 취약점을 보완하는 것을 주요 목표로 하고 있다.

참고문헌

1. 김낙영, 김성환, 정형식, 2001, 도로터널에서 지보패턴별 굴착지수 상관관계 고찰, 한국터널공학회 터널기술논문집, Vol. 3, No. 14, pp. 17-24.
2. 이현구 등, 2005, 천공파라미터 분석을 통한 터널 전방 암질 예측, 삼성건설 기술집(토목사업부), pp. 301-306.
2. Kahraman, S., C. Balci, S. Yazici and N. Bilgin, 2000, Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 37, pp. 729-743.
4. Thuro. K, 1997, Drillability prediction-geological influences in hard rock drill and blast tunnelling, Geol Rundsch, Vol. 86, pp. 426-438.
5. Thuro. K, 2003, Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting : rock parameters for excavatability, ISRM - Technology roadmap for rock mechanics, pp. 1227-1234.
6. 井上 博之, 1999, ぐり削孔時の打撃エネルギーとボーリングコアでの岩盤区分との関係について, 土木學會第54回年次講演會, pp.78-79.
7. 安田吾, 2003, 油壓ドリルジャンボの穿孔データを用いた切羽前方地山評価, 土木學會第58回年次講演會, pp. 21-22.