

균질암반에서의 유압식 천공데이터 평가

김광염^{1)*}, 김창용¹⁾, 김광식¹⁾

Assessment of Hydraulic Drilling Data on Homogeneous Rock Mass

Kwang-Yeom Kim, Chang-Yong Kim, Kwang-Sik Kim

Abstract The drilling monitoring is a technique to assess rock mass properties by analyzing the mechanical quantities measured by drilling process. Since drilling survey can be conducted on real-time-basis for excavating blast holes or rockbolt holes, it may enables fast and quantitative prediction and evaluation of rock mass. Though a number of studies have been conducted on the drilling data, the selection of drilling parameters and numerical quantification of mechanical quantities or rock mass have not been well established yet. In this study, drilling tests were conducted with homogeneous rock specimen to identify drilling parameters and the relation of the drilling data. As a result, it is verified that above all drilling parameters, the percussion was the most important factor on the excavatability of hydraulic drilling.

Key words Drilling monitoring, Drilling data, Drilling parameter, Hydraulic rock drill

초 록 천공탐사는 암반 굴착시 점보드릴의 유압착암기로부터 계측되는 기계량들인 천공데이터를 분석하여 암반의 특성을 평가하는 기법이다. 천공탐사는 발파공 또는 록볼트공 천공시 실시간으로 계측할 수 있기 때문에 암반을 신속하고 정량적으로 예측 및 평가할 수 있는 장점이 있다. 현재까지도 천공데이터에 관한 다양한 연구가 수행되어져오고 있지만, 암반 특성을 평가하기 위한 천공파라미터들의 항목 선정과 기계량들의 수치적인 정량화가 정립되어있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 암석 및 지반 특성을 평가할 수 있는 천공파라미터의 항목 선정 및 천공시 천공데이터들 간의 관계를 파악하기 위해 균질 모형 암석 시험편을 제작하여 천공데이터를 획득하였고, 획득된 천공데이터를 이용하여 천공파라미터들의 상관관계 분석을 수행하였다. 분석 결과를 통해 유압착암기의 굴착능력은 타격에 의해 가장 큰 영향을 받음을 확인하였다.

핵심어 천공탐사, 천공데이터, 천공파라미터, 유압착암기

1. 서론

천공데이터를 이용하여 굴착 대상 암반의 특성을 파악하기 위한 천공탐사 기술은 점보드릴에 유압센서 및 데이터 레코더를 장착하여 천공속도(instantaneous advance speed), 회전압(torque pressure), 타격압(percussion pressure), 피드압(feed pressure) 등을 측정하고 분석하는 과정으로 이루어진다. 이를 통해 굴진면 전방의 암반 상태를 사전에 예측하고 발파 및 지보설계 등에 피드백하여 공사의 효율성을 증대시키고 시공 중 안정성을 향상시킬

수 있다(Peck and Vynne, 1993; Pfister, 1985; Schunnesson, 1996; Toda 건설, 2005; Mituisumitomo 건설, 2005). 이러한 천공탐사는 일반적인 터널 시공 중 조사 방법(막장관찰, 변위 계측, 물리탐사)과 비교하여 비교적 신속하고 정량적인 결과를 도출할 수 있다.

국내·외 문헌조사에 의하면 천공파라미터를 이용한 천공탐사는 선진국을 중심으로 터널 및 광산 등의 토목 현장에서 다양하게 이용되고 있으며, 특히 터널 시공현장에서 터널 굴진면 전방의 지반상황을 정량적으로 예측하고, 지반의 안정성 파악 및 지보패턴 결정 등에 활용되고 있다. 그러나 다음과 같은 문제점들이 있다. 천공탐사는 직접적인 천공에 대한 지반의 반응을 측정하는 것이 아니라 천공시 사용된 유압착암기의 기계량을 측정하기 때문에 측정된 기계량에 대한 의미부여, 천공 파라미터들의 항목 선정 및 정확한 지반평가를 위한 천

¹⁾ 한국건설기술연구원 지하구조물연구실

* 교신저자 : kimky@kict.re.kr

접수일 : 2008년 12월 4일

심사 완료일 : 2008년 12월 10일

게재 확정일 : 2008년 12월 17일

공데이터의 수치화가 명확하지 않다. 또한 천공데이터를 활용하여 지반 특성을 평가하기 위해서는 지질 특성, 천공장비 특성, 장비 조작 등에 대한 인자들의 고려가 필요하다.

본 연구는 천공데이터를 활용하여 급속시공을 위한 지반거동분석 시스템인 천공데이터 분석 시스템을 개발하기 위한 목적으로 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 천공데이터 분석 시스템을 개발하기 위한 기초자료로 이용하기 위해 유압착암기의 천공메커니즘을 고려하여 천공데이터 수집 장치에서 측정되는 타격압, 피드압, 회전압, 천공속도와 측정된 천공데이터를 이용하여 계산되는 천공에너지와 회전저항을 천공파라미터로 선정하였다. 또한 천공데이터와 암석 특성들과의 관계 및 천공파라미터들 간의 관계를 파악하기 위해 균질한 모형 암석 시험편을 제작하여 각 공의 유압설정(타격압, 회전압, 피드압)을 변화시키지 않고 천공시험을 수행하였다. 천공시험을 통해 측정한 천공파라미터들(타격압, 피드압, 회전압, 천공속도, 회전저항, 천공에너지)과 암석 특성들 간의 관계에 대하여 살펴보았다. 또한 천공파라미터들 간의 상관관계를 분석하기 위해 측정한 천공데이터는 각 천공데이터의 천공 심도별 평균값을 이용하여 시험편을 천공할 때 필요한 각각의 천공파라미터들의 평균값을 도출하였고, 도출된 천공파라미터의 평균값으로 천공파라미터들 간의 상관관계분석을 수행하였다. 상관관계 분석 결과를 통해 유압식 착암기의 천공메커니즘을 검증하였다.

2. 국·내외 천공데이터 연구 동향

현재까지의 국내외 천공데이터 관련 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다. 유압식 착암기에서 천공시 획득된 천공데이터는 대상 지반의 특성과 높은 상관도를 보이기 때문에 시공중 굴진면 조사를 위한 정량적 평가방법으로 유용하다는 연구결과가 발표되었다(Thuro, 1997, 2003 ; Kahraman, 2000). 천공파라미터를 이용한 천공탐사는 선진국을 중심으로 터널 및 광산 등의 토목 현장에서 다양하게 이용되고 있다. Deveaux et al.(1983)와 Schneider(1983)는 연약대 및 지하수 지역 등의 탐지를 위해 천공탐사를 이용하였으며, Brown and Barr(1978)은 천공데이터를 이용한 천공탐사가 암질 구분과 파쇄대의 위치를 파악하는데 이용될 수 있음을 밝혀냈다. Leighton(1983)은 발파공을 천공시 굴진율(penetration rate)의 변화를 이용한 연암 및 경암의 위치 확인을 통해 발파설계를 개선할 수 있다고 하였다. 특히 일본에서는 터널 굴진면 전방의 지질 특성을 예측 할 수 있는

천공탐사시스템 구축을 위해 많은 연구 및 개발이 진행 중이며 이미 상용화하여 사용되고 있다. 그 예들을 살펴보면 Toda 건설(2005)은 유압착암기의 천공데이터로부터 천공구간의 지반성상을 평가하는 시스템인 “산악 터널 막장전방천공검사시스템(DRISS)”를 개발하였다. Mutsuisumito 건설(2005)은 굴진면 전방탐사에 추가하여 록볼트공, 발파공과 같은 시공 사이클에 포함된 막대한 양의 천공데이터를 효율적으로 처리하고, 시스템 전체를 자동화시키기 위한 “천공데이터검층시스템”을 개발하였다. 이러한 천공데이터에 관한 연구 결과들은 터널 굴진면 전방의 지반상황을 정량적으로 예측하고, 지반의 안정성 파악 및 지보패턴 결정 등에 활용되고 있다.

국내의 경우 천공파라미터 관련 연구는 김낙영 등(2001)에 의해 수행되나 있지만 선진국에 비해서는 기초적인 수준에 머물러 있고, 독자적인 천공데이터 획득 및 분석 시스템이 없는 실정이다. 국내의 일부 건설사들은 국외에서 수입한 천공분석 장비를 이용해 천공탐사를 일부 현장에 적용하였지만 수입된 분석 장비간의 호환성 문제, 고가의 컴퓨터 장비에 대한 현장 근로자의 조작 능력 부족, 현장 데이터의 분석기술 난제 등으로 제대로 활용되지 못하고 있다. 천공데이터 분석 시스템이 현장에서 제대로 활용되기 위해서는 국내 시공 여건에 맞는 천공 데이터 분석 시스템 개발이 선행되어야 하며 이를 통해 국내 다양한 지반에 대해서 데이터가 충분히 축적되어야 한다.

3. 천공메커니즘을 고려한 천공파라미터 선정

천공탐사를 통해 측정되는 천공데이터는 지반의 풍화 정도, 파쇄정도(Barr, 1984; Scoble and Peck, 1987), 연경정도(Shunnesson and Sturk, 1997), 암종의 경계(Shunnesson and Holme, 1997) 등의 지반에 대한 정량적인 정보를 내포하고 있다. 그러나 단일 천공파라미터만으로 지반의 상태를 정확히 예측하고 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러므로 막장 전방 지반의 상태를 예측하고 평가하기 위해서는 측정한 각각의 천공파라미터들의 조합 및 천공파라미터들 간의 분석을 통해 이루어 질 수 있다(Shunnesson, 1998; Scoble, Peck and Hendricks, 1989; Kim, 2008). 특히, 천공 데이터를 활용하여 암석 특성들과의 관계를 분석하기 위해서는 천공파라미터의 선정이 중요하기 때문에 본 연구에서는 유압식 착암기의 천공메커니즘을 고려하여 천공파라미터들을 선정하였다.

3.1 유압식 착암기의 천공메커니즘

일반적으로 점보드릴의 유압식 착암기를 이용한 굴착은 타격굴착을 기본으로 한다. Fig. 1에서 모식적으로 나타낸 것과 같이 굴착이 진행된다. 점보드릴의 유압식 착암기에 연결된 로드(rod)와 버튼비트(button bit)는 타격, 회전 피드(feed)에 의해 암반 굴착에 필요한 에너지를 굴착 대상 암반면에 전달한다. 점보드릴의 로드와 연결된 버튼비트의 타격으로 인해 접촉한 암반은 파쇄되어 암편화된다. 타격에 의해 암편화된 암반은 비트의 회전에 의해 분쇄되고, 천공홀 밖으로 배출되어 공입구까지 운반된다. 또한 이 회전에 의해 버튼비트는 새로운 타격위치로 자리를 잡고 다음 천공작업의 준비가 이루어진다. 타격 및 회전이 유효하게 작용하기 위해서는 암반에 비트가 확실하게 밀착될 필요가 있으며, 이것은 피드에 의해 암반에 비트를 밀착시키며 새로운 암반을 타격하여 굴착이 이루어진다. 그러므로 유압착암기의 천공속도는 타격에 의해 암반을 파쇄하는 능력과 파쇄된 암반을 배출하는 능력에 의해 결정된다. 그러나 후자의 영향은 매우 작으며, 천공속도는 타격능력에만 의존한다는 것이 일반적이다. 또한 가장 빠른 천공속도와 유압착암기의 성능에 대한 관계를 정식화한 문헌(Tamrock, 1999)에서도 타격 능력에만 착안하고 있다고 기술하고 있다.

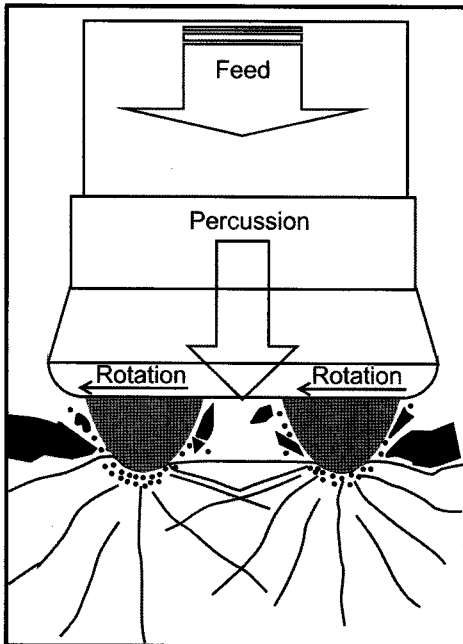


Fig. 1. Drilling mechanism of hydraulic rock drill.

3.2 천공파라미터

본 연구에서 이용된 천공파라미터들은 유압식 착암기의 천공메커니즘을 고려하여 타격압, 회전압, 피드압, 천공속도를 선정하였으며, 이는 천공데이터 수집 장치를 이용하여 계속된다. 또한 보다 정밀한 지반평가를 위해 균열의 발달정도를 나타내는 회전저항과 암반의 연경 지표로 이용되는 천공에너지를 추가하였다. 회전저항과 천공에너지는 측정된 천공파라미터들(타격압, 회전압, 피드압, 천공속도)과 천공장비, 천공조건 등에 의해 계산된다.

회전저항은 비트와 암반의 마찰저항력을 의미하며, 회전압과 피드압의 비로서 식 (1)과 같다. 이때 회전저항은 무차원으로 표시된다.

$$Tr = \frac{TP}{FP} \quad (1)$$

여기서, Tr : 회전저항

TP : 회전압[bar]

FP : 피드압[bar]

암반의 강도를 추정하는 파라미터로서 이용되는 천공에너지는 식 (2)와 같다. 천공에너지는 암석이 단단할수록 더 많은 천공에너지를 필요로 한다.

$$E_d = \frac{E_p \times N_s}{A_R \times IAS} \quad (2)$$

여기서, E_d : 천공에너지 [J/m³]

IAS : 천공속도[m/min]

A_R : 천공 단면적[m²]

E_p : 피스톤 타격에너지[J]

N_s : 피스톤 타격회수

식 (2)의 분자는 천공에 투입된 에너지를 나타내고, 분모는 이에 의해 굴착된 암피의 체적을 나타낸다. 그러므로 천공에너지는 단위체적의 암피를 천공하기 위해 소비되는 에너지를 나타낸다. 이때 피스톤 타격에너지 E_p 는 식 (3)에 의해 구할 수 있다. 피스톤 스트로크는 피스톤 1회 왕복운동 시 피스톤의 왕복 거리를 의미한다.

$$E_p = a_p \times PP \times L_p \quad (3)$$

여기서, a_p : 피스톤 단면적 [m²]

PP : 타격압 [bar]

L_p : 피스톤 스트로크 [m]

피스톤 타격회수 N_s 는 유압식 착암기들마다 설정된 타격수의 값을 가지고 있기 때문에 식 (4)에 의해 구할 수 있다.

$$N_s = N \times 60 \times \frac{l}{IAS} \quad (4)$$

여기서, N_s : 피스톤 타격회수

N : 타격수[Hz]

l : 천공단위 길이[m]

IAS : 천공속도[m/min]

천공에너지지를 표현하는 식 (2)은 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{E_c}{l} = \left(N \times 60 \times L_s \times \frac{a_p}{A_R} \right) \frac{PP}{IAS^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 우변의 괄호 안은 천공 장비와 천공 조건으로부터 정해지는 정수들이다. 그러므로 천공방향에 따른 천공에너지의 변화는 타격압과 비례하며, 천공속도의 제공에 반비례하게 된다.

4. 암석 시험편 천공시험

4.1 암석 시험편 제작 및 천공시험

암석 시험편 천공시험은 시험편의 천공데이터를 획득하기 위해 수행하였다. 천공시험에 이용된 암석 시험편은 국내 포천지역의 포천화강암으로 정육면체인 1 m × 1 m × 1 m의 크기로 제작하였다. 제작된 화강암 시험편은 균질한 대상체로 가정하기 위해 육안으로 균열이 관찰되지 않는 최대한 무결한 암석을 사용하였다. 천공

시험에 이용된 천공장비는 Atlas Copco의 boomer 353E 점보드릴로, COP 1638ME 모델의 유압식 착암기를 사용하였다. 천공데이터는 천공데이터 수집 장치를 이용하여 회전압, 타격압, 피드압, 천공속도를 측정하였다. 천공데이터 수집 장치는 점보드릴의 붐대(boom), 유압호스 및 배터리에 장착된다. 천공데이터 수집 장치의 장착은 크게 3부분이며, 장착순서는 다음과 같다(Fig. 2).

- ① 천공속도 센서 거치대 장착 및 천공속도 센서 연결
- ② 점보드릴의 유압호스에 유압센서 연결 및 signal converter 연결
- ③ 데이터 로거에 각종 센서 및 전원 연결

천공데이터 수집 장치의 장착 및 탈착에 소요되는 시간은 약 0.5~1시간 정도 소요되며, 장착할 천공장비에 대한 사전 조사를 통해 천공속도 센서 거치대 및 유압 연결 호스의 사이즈를 알면 장착에 소요되는 시간을 절약할 수 있다.

암석 시험편 천공은 Fig. 3과 같이 점보드릴의 붐대를 수직으로 세워 비트와 시험편의 천공면이 수직이 되도록 위치시키고, 시험편을 100 cm 길이로 총 5 공을 천공하여 관통시켰다. Fig. 3(a)은 천공시험의 개략적인 모식도를 나타내며, Fig. 3(b)은 실제 천공하는 모습을 보여준다. 천공에 사용된 비트는 터널 현장에서 발파공 천공시 주로 사용하는 직경 45 mm의 버튼비트(button bit)를 이용하여 천공홀의 직경이 50 mm가 되도록 천공하였다(Fig. 4). 각 공의 천공 중에는 유압설정(타격압, 피드압, 회전압)을 변화시키지 않고 천공작업을 수행하였다. 천공시험 동안 이용된 유압들의 평균값은 Table 1과 같다. 시험을 통해 얻어진 천공데이터는 1개의 화강암 시험편에서 총 5개의 천공 홀에 대한 천공파라미터들(타격압, 회전압, 피드압, 천공속도)의 값을 측정하였다.

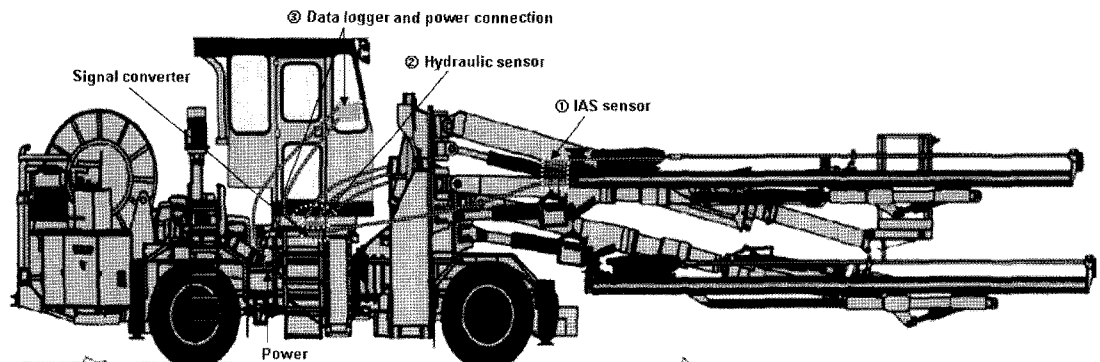
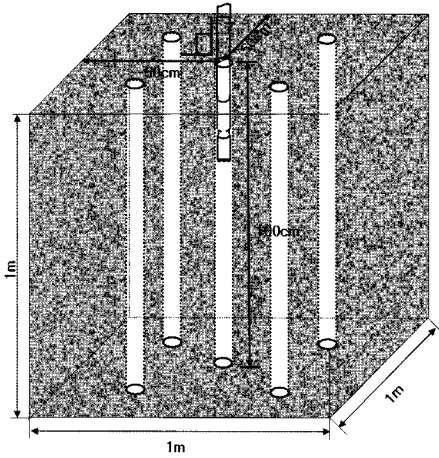
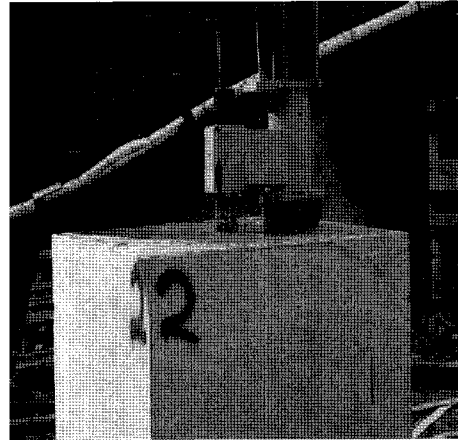


Fig. 2. Schematic diagram of data collection instrument installed on jumbo drill.

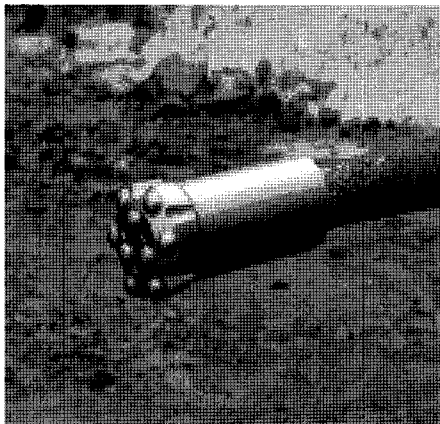


(a) Schematic diagram of drilling test and rock specimen.



(b) Drilling of rock specimen.

Fig. 3. Drilling test of rock specimen.



(a) Button bit



(b) Diameter of drill hole

Fig. 4. Button bit and drilled hole in the drilling test.

Table 1. Hydraulic pressure from drilling holes during drilling test.

Drilling hole	Hydraulic pressure		
	Feed pressure	Torque pressure	Percussion pressure
No. 1	50	55	108
No. 2	62	55	142
No. 3	65	55	141
No. 4	65	56	135
No. 5	48	46	104

4.2 천공데이터 결과

천공데이터 수집 장치에 의해 획득한 포천화강암 시험편의 천공데이터는 천공속도, 피드압, 회전압, 타격압

에 대하여 계측하였다. 천공데이터 결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같고, 천공 깊이에 따른 각각의 천공파라미터들의 변화량에 대한 관계로 도시하였다. Fig. 5는 5 공의 천

공 홀에서 천공파라미터들의 변화를 보여준다. Fig. 5에서 Fig. 6은 각 천공 홀 당 천공파라미터들의 변화를 보여준다. Fig. 5와 Fig. 6에서 T_r 과 E_d 는 계측된 천공파라미터들(IAS, FP, TP, PP)에 의해 계산되어졌다. Fig. 6(b)에서 유압 파라미터들의 값은 거의 일정하지만 천공속도와 천공에너지의 값은 변화량이 크게 나타났다. 천공속도의 변화는 다음과 같은 경우를 통해 알 수 있다. 첫째, 균질한 매질을 천공한다고 가정할 때 천공속도는 각 유압(FP, TP, PP)들의 변동에 따라 변화되지만 각 유압들이 일정하다면 천공속도도 일정할 것이다. 둘째, 불균질한 매질을 천공한다고 가정할 때 천공속도는 유압들을 일정하게 유지해서 천공하여도 불균질한 매질의 특성상 천공속도는 변할 것이다. 따라서 천공데이터의 결과에서 천공속도의 변화는 후자에 해당한다. 이는 제작된 포천화강암 시험편을 균질한 대상체로 가정하였고, 각 유압들(FP, TP, PP)을 일정하게 유지하며 천공을 수행하였지만 천공속도의 변화폭이 심한 것은

암석의 구성광물 또는 암석 내부에 육안으로 관찰이 힘든 미세한 균열 등에 의한 영향과 천공장비의 특성에 의한 영향일 것으로 판단된다. 이 부분은 차후 암석을 구성하는 광물의 성분 분석 및 천공장비 특성 연구를 수행할 계획이다. Fig. 6(a)에서 T_r 은 지질성상의 지표로서 시험편이 균질한 대상체로 가정하였기 때문에 일정할 것이라는 예상과는 일치했지만, 이는 천공 동안 TP와 FP가 일정하게 유지되었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6(b)에서 천공에너지는 천공속도와 같이 값의 변화폭이 심하며 천공속도와는 역관계를 나타냈다. 이는 천공에너지는 PP에 비례하고 IAS의 제곱에 반비례하기 때문에 PP가 거의 일정하여 천공에너지는 IAS에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다.

본 천공시험 결과를 통해 T_r 이 암석의 지질성상의 지표로 이용되고, E_d 가 암석의 연경정도를 나타낼 수 있는지는 알 수 없었지만 차후 다양한 현장 적용 및 암종별 암석 시험편 천공시험을 통해 천공장비 특성 연구

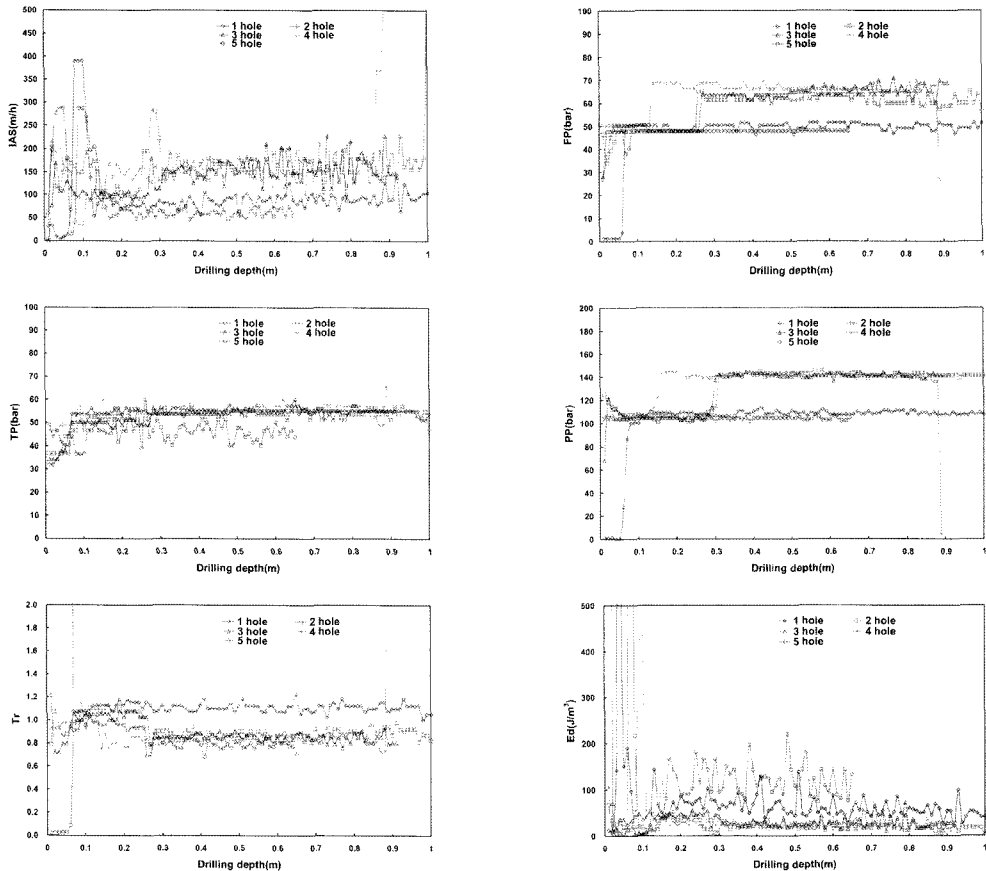
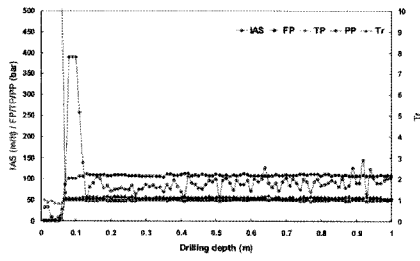
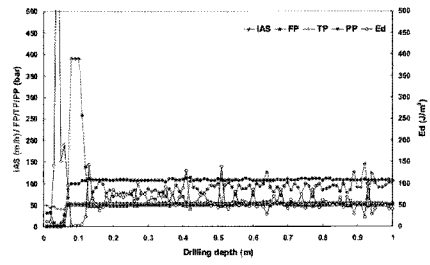


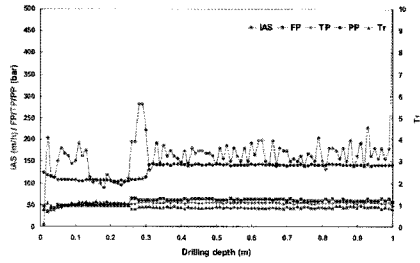
Fig. 5. Results of drilling data measured from drilling holes.



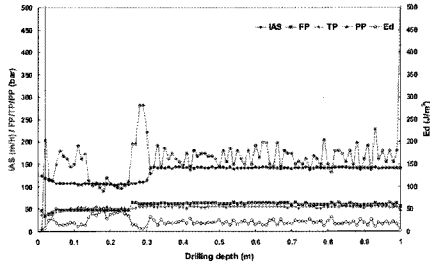
No. 1 drilling hole



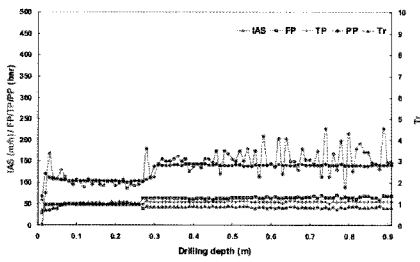
No. 1 drilling hole



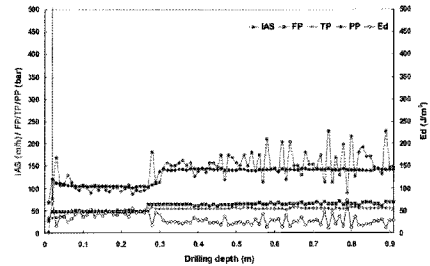
No. 2 drilling hole



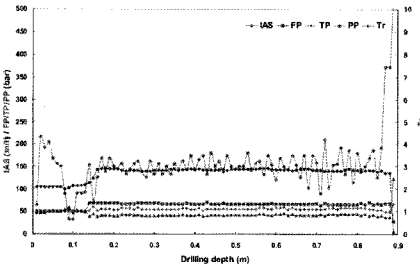
No. 2 drilling hole



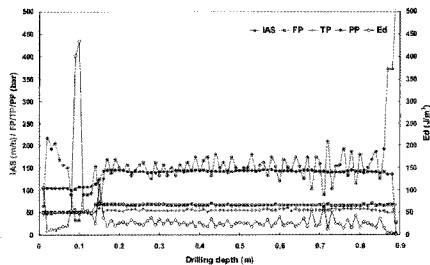
No. 3 drilling hole



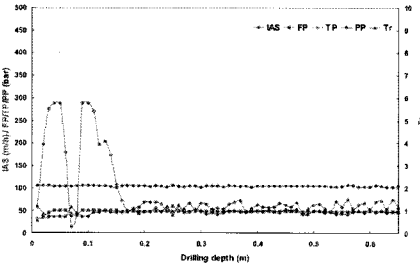
No. 3 drilling hole



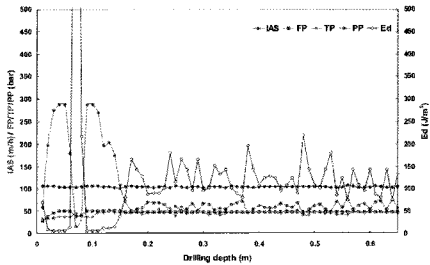
No. 4 drilling hole



No. 4 drilling hole



No. 5 drilling hole



No. 5 drilling hole

(a) Drilling parameters and torque resistance.

(b) Drilling parameters and drilling energy.

Fig. 6. Results of drilling data measured from each drilling hole.

및 천공파라미터들과 암석 특성들에 관한 연구를 수행할 계획이다.

5. 천공파라미터들 간의 상관관계 분석 결과

암반의 천공은 점보드릴의 유압식 착암기에서 추력, 회전력, 타격력이 복합적으로 암반에 전달되어 굴착이 이루어진다. 이때 천공속도는 천공장비에서 전달되는 에너지의 크기와 지반의 특성에 따라 다른 값의 변화량을 보인다. 본 연구에서는 암석 시험편을 균질한 대상으로 가정하였기 때문에 최대한 균질하고 무결한 암석으로 제작하여 천공속도에 영향을 주는 인자들 중 하나인 지반특성 변화에 따른 영향을 배제한 것으로 간주하였다. 그리고 각각의 천공파라미터들의 관계를 파악하기 위해 각 천공파라미터들 간의 상관관계를 분석하였다.

천공파라미터들 간의 상관관계는 천공된 구간(0~1 m)에 걸쳐 총 5 공의 천공홀에 대한 천공데이터를 이용하여 분석하였다. 그러나 각 천공파라미터들 간의 상관관계는 찾을 수 없었다. 그러므로 본 연구에서는 해석에 이용될 천공데이터의 값들을 도출하기 위해 구간별 평균값을 적용하였다.

Fig. 6에서 천공데이터 해석시 이용한 천공데이터 값은 각 천공 홀마다 차이는 있지만 0.3 m 이후의 데이터를 사용하였다. 천공데이터 해석시 Fig. 6에서 0.3 m 이전의 천공데이터 값들은 시험편 천공을 수행할 때 드릴로드의 비트가 천공할 정확한 자리를 잡기위해 수행하는 자리잡기(collaring)에 해당하는 구간이다. 그러므로 천공데이터 분석시 실제 화강암 시험편을 천공할 때 이용된 천공파라미터들의 값은 자리잡기가 끝난 후의 천

공데이터를 이용해야만 한다. 본 연구에서 이용된 천공파라미터들 값은 자리잡기가 끝난 이후의 0.3~1 m 구간에 대한 평균값을 이용하여 상관관계를 분석하였다.

본 연구에서 천공파라미터들 간의 상관관계를 알아보기 위해 상관분석과 회귀분석을 수행하였다. Table 2는 총 5 공의 천공파라미터들의 구간별 평균값에 대해 상관계수를 이용하여 천공파라미터들 간의 상관관계를 분석한 결과이다. 상관분석 결과를 통해 천공파라미터들 간의 관계를 살펴보면 다음과 같다. 유압착암기의 유압들인 FP, TP, PP를 살펴보면, FP와 PP의 경우 상관성이 매우 높고, TP는 상관성이 있으므로 나타났다. IAS에 영향을 주는 유압 파라미터들인 FP와 PP의 경우 상관성이 매우 높음, TP는 상관성이 높음으로 나타났다. 천공데이터 분석을 통해 얻어지는 T_r 과 E_d 중 T_r 의 경우 FP, PP는 상관성이 매우 높음, IAS는 상관성이 높음, E_d 는 상관성이 있음, TP는 상관성이 거의 없으므로 나타났다. E_d 의 경우 IAS, TP, TQ, PP는 상관성이 매우 높음, T_r 는 상관성이 있으므로 나타났다.

천공파라미터들 간의 관계를 더 자세히 알아보기 위해 상관분석을 통해 상관성이 매우 높은 천공파라미터들에 대한 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과는 Fig. 7과 같고, 전체적으로 선형관계를 보이지만, E_d 의 경우 IAS, FP, PP와는 비선형관계를 보이고 있다. IAS, TP, PP, E_d 간의 결정계수는 0.9333~0.9819로 매우 높은 적합성을 보이고 있다.

상관분석과 회귀분석을 이용한 상관관계 분석 결과들을 통해 암반 천공시 천공속도에 영향을 주는 인자로는 피드압, 타격압이며, 회전압은 굴착능력 보다는 천공시 타격에 의해 깨어진 암반을 분쇄화하기 때문에 피드압

Table 2. Results of the correlation analysis of the drilling parameters.

Drilling parameter	Advance speed (IAS)	Feed pressure (FP)	Torque pressure (TP)	Percussion pressure (PP)	Torque resistance (T_r)	Drilling energy (E_d)
Advance speed (IAS)	1	0.975	0.743	0.969	- 0.730	- 0.936
Feed pressure (FP)	0.975	1	0.660	0.973	- 0.821	- 0.883
Torque pressure (TP)	0.743	0.660	1	0.643	- 0.128	- 0.912
Percussion pressure (PP)	0.969	0.973	0.643	1	- 0.830	- 0.899
Torque resistance (T_r)	- 0.730	- 0.821	- 0.128	- 0.830	1	0.506
Drilling energy (E_d)	- 0.936	- 0.883	- 0.912	- 0.899	0.506	1

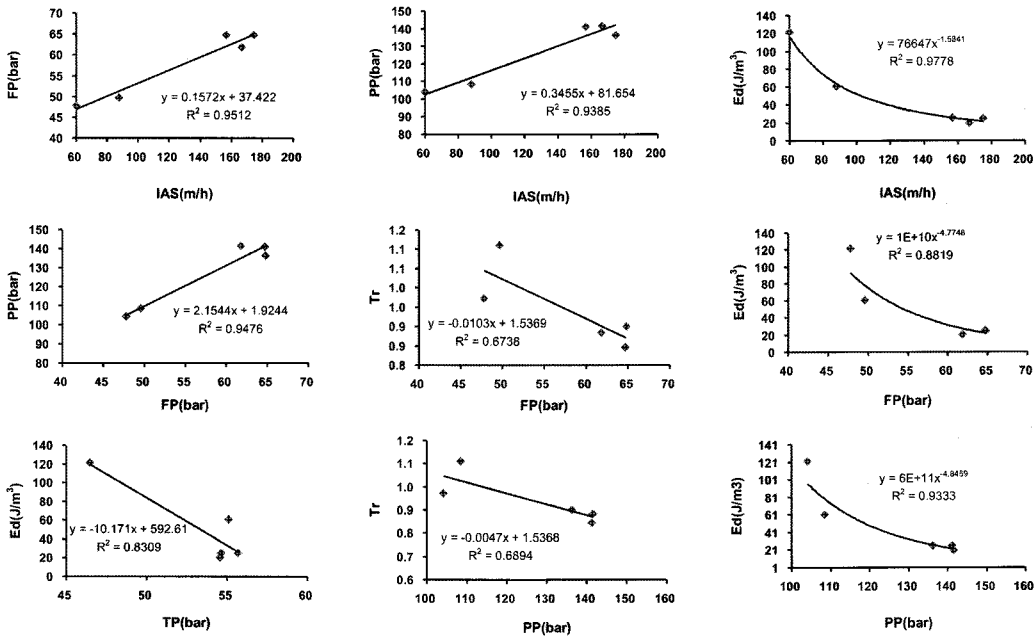


Fig. 7. Results of the regression analysis on drilling parameters using sectional average values.

나 타격압 보다는 천공속도에는 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 또한 압의 연경과 관련이 있을 것으로 간주한 천공에너지는 타격과 관련이 있는 타격압, 피드압, 천공속도와 높은 음의 상관관계를 보였다. 지질성상을 나타내는 파라미터인 회전저항 역시 피드압, 타격압과 매우 높은 음의 상관관계를 나타내고 있다. 그러므로 천공파라미터 별 상관관계 분석을 통해 천공속도는 회전능력과 타격능력에 의해 영향을 받지만 타격능력이 보다 지배적인 요소임을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 유압착암기의 천공메커니즘을 고려하여 천공파라미터들을 선정하였고, 선정된 천공파라미터들 간의 관계를 규명하기 위해서 암석 시험편 천공시험을 수행하였다. 계측된 천공파라미터들은 상관관계 분석을 통해 각 천공파라미터들 간의 관계에 대하여 확인하였다. 본 연구로부터 이하의 결론을 얻을 수 있었다.

화강암 시험편의 천공데이터는 제작된 화강암 시험편을 균질한 대상체로 가정하고 회전압, 피드압, 타격압을 일정하게 유지하여 천공하였다. 회전저항은 변화량이 일정하였지만, 천공속도와 천공에너지는 큰 폭의 변화량을 보였다. 이는 암석의 구성광물 또는 암석 내부에 육안으로 관찰이 힘든 미세한 균열 등에 의한 영향과

천공장비의 특성에 의한 영향일 것으로 판단된다. 또한 회전압, 피드압, 타격압의 경우 시험편 내에 불연속면 및 압질 등의 변화가 나타나지 않기 때문에 일정하게 유지된 것으로 판단된다.

천공파라미터들 간의 상관관계는 천공속도, 타격압, 피드압, 천공에너지들 간에 매우 높은 상관관계를 보였지만, 회전압과 회전저항은 매우 높은 상관관계를 보이지 않고 있다. 이를 통해 유압식 착암기에 의한 암반 굴착능력이 회전능력과 타격능력에 의해 영향을 받지만 타격능력이 보다 지배적인 요소임을 확인하였다.

본 연구를 통해 천공에너지와 회전저항이 암석 특성에 대한 평가 척도로 이용될 수 있는지에 대한 가능성을 검증하지는 못했지만, 기존의 천공에너지 식이 타격력만을 고려하여 만들어졌기 때문에 회전력에 대한 고려가 되어 있지 않다. 그러나 실제 암반을 파괴하는 에너지는 타격력뿐만 아니라 회전력에 대한 고려도 필요하다고 사료된다. 차후 회전력을 고려한 암반파괴에너지 식을 제안할 수 있도록 많은 연구를 진행할 계획이다.

향후 다양한 암종 별 암석 시험편 천공시험을 수행하여 천공데이터와 암석 특성들과의 관계 규명을 통해 지반특성을 평가할 수 있는 기초 자료의 확보 및 D/B화하여 신속하고 정확한 막장전방의 지질구조 예측 및 지반평가가 가능한 분석 시스템을 개발하도록 할 예정이다.

사 사

본 연구는 건설교통부의 2007년 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공 기술개발(과제번호 : C105A1020001-05A0502-00240)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김낙영, 김성환, 정형식, 2001, 도로터널에서 지보패턴별 굴착지수 상관관계 고찰, 한국터널공학회 터널기술논문집, Vol. 3, No. 14, pp. 17-24.
2. Barr, M. V., 1984, Instrumented horizontal drilling for tunnelling site investigations. Ph.D. thesis, Imperial College of Science and Technology, London, U.K.
3. Brown, E.T. and Barr, M.V., 1978, Instrumented Drilling as an Aid to Site Investigations, Proc. 3rd Int'l. Congr., Int'l. Assoc. Engng.
4. Deveaux, Martin et al., 1983, Instantaneous Logging in Water Survey, Bull. of Int'l. Assoc. Of Engng. Geol., No. 26-27, pp. 59-63.
5. Kahraman, S., Balç, C., Yazc, S., Bilgin, N., 2000, Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 37, pp. 729-743.
6. K. Y. Kim, K. S. Kim, C. Y. Kim and D. G. Kim, 2008, Prediction of Rock Mass Properties Ahead of Tunnel Face Using Drilling Parameter, 13th Australian Tunnelling Conference, pp. 203-207.
7. Leighton, J. C., 1983, Correlating Rotary Drill Performance to Powder Factors for Improved Blasting Control, 36th Cdn. Geotech. Conf., Vancouver, B.C., June 1983, pp. 4.1.1-4.1.10.
8. Mituisumitomo corporation, 2005, Tunnel rock mass evaluation that uses Drill-Logging system, Proceedings of the 60th Symposium, Japan Society of Civil Engineers, pp. 9-10.
9. Peck, J. and Vynne, J. F., 1993, Current status and future trends of monitoring technology for drills, Proceedings Int. Mining Geology Con., Kalgoorlie, Australia. pp. 311-325.
10. Pfister, P., 1985, Recording drilling parameters in ground engineering, Geodrilling, pp. 8-14.
11. Schunnesson, H., 1996, RQD predictions based on drill performance parameters, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 345-351.
12. Schunnesson, H., 1998, Rock characterisation using percussive drilling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 6. pp. 711-725.
13. Schunnesson, H. and Holme, K., 1997, Drill monitoring for geological mine planning in the Viscaria copper mine, Sweden. CIM Bull., 90, pp. 83-89.
14. Schunnesson, H. and Sturk, R., 1997, Drill Monitoring at the Hallandsås Project in Sweden, Research Report, Vol. 21, Lileå University of Technology, Sweden.
15. Scoble, M. J. and Peck, J., 1987, A technique for ground characterization using automated production drill monitoring, Int. Journal of Surface Mining 1: pp. 31-54.
16. Scoble, M. J., Peck, J. and Hendricks, C., 1989, Correlation between rotary drill performance parameters and Borehole geophysical logging, Mining Science and Technology, 8, 301-312.
17. Tamrock 1999, Rock excavation handbook for civil engineering, pp. 62-70.
18. Thuro K., 1997, Drillability prediction-geological influence in hard rock drill and blast tunneling, Geol. Rundsch. Vol. 86, pp. 426-438.
19. Thuro K., 2003, Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting : rock parameters for excavatability, ISRM-Technology roadmap for rock mechanics, pp. 1227-1234.
20. Toda corporation, 2005, Prediction of Geological condition forward of tunnel face with drilling data, Proceedings of the 60th Symposium, Japan Society of Civil Engineers, pp. 13-14.



김 광 염

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사
Tel: 031-910-0225
E-mail: kimky@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지하구조물연구실
연구원



김 창 용

1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1999년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학박사
Tel: 031-910-0224
E-mail: cykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지하구조물연구실
책임연구원



김 광 식

2004년 충북대학교 자연대학 지구환경과
학과 이학사
2006년 충북대학교 자연대학 지구환경과
학과 이학석사
Tel: 031-910-0775
E-mail: kwangks@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지하구조물연구실
연구원