

천공데이터를 이용한 터널 굴진면 전방 암반강도 예측

김광염^{1)*}, 김성권¹⁾, 김창용¹⁾, 김광식¹⁾

Prediction of Rock Mass Strength Ahead of Tunnel Face Using Hydraulic Drilling Data

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

Abstract Appropriate investigation of ground condition near excavation face in tunnelling is an inevitable process for safe and economical construction. In this study mechanical parameters from drilling process for blasting were investigated for the purpose of predicting the ground condition, especially rock mass strength, ahead of tunnel face. Rock mass strength is one of the most important factors for classification of rock mass and making a decision of support type in underground construction. Several rock specimens which are considered homogeneous and having different strength values respectively were tested by hydraulic drill machines generally used. As a result, penetration rate is fairly related with rock mass strength among drilling parameters. It is also found that penetration rate increases along with the higher impact pressure even under same rock strength condition. It is finally suggested that new prediction method for rock mass strength using percussive pressure and penetration rate during drilling work can be utilized well in construction site.

Key words Ahead of tunnel face, Drilling data, Penetration rate, Prediction of rock mass strength

초 록 터널 굴착시 굴진면 전방의 지반상태를 사전에 파악하는 것은 터널의 안정성을 증가시키고 동시에 시공성을 향상시켜 경제적인 터널 시공을 할 수 있도록 한다. 이에 본 연구에서는 터널 천공시 획득되는 천공데이터를 이용하여 굴진면 전방의 암반강도를 예측하고자 하였다. 이는 암반강도가 현장에서 암반분류 및 지보패턴 설계 등의 핵심인자로 가장 보편적으로 활용될 뿐만 아니라, 암반강도의 변화를 통해 굴진면 전방의 지반상태 변화를 예측하는데도 활용할 수 있기 때문이다. 이를 위해 본 연구에서는 다양한 강도 특성을 보이는 균질한 암석시편을 대상으로 착암기 종류를 변화시켜가며 천공실험을 수행하였다. 실험결과 천공속도는 다른 천공데이터들과 착암기의 종류 및 암석의 강도에 따라 고유한 값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 암석에 대해 천공시 타격압이 증가하면 천공속도는 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 터널 시공 현장에서 착암기의 제원, 현장 계측 데이터 및 천공속도와 암반강도의 상관관계를 이용하여 터널 굴진면 전방의 암반강도를 예측할 수 있는 방안을 제안하였다.

핵심어 터널 굴진면 전방, 천공데이터, 천공속도, 암반강도 예측

1. 서 론

터널 시공 중 발생하는 지반붕괴는 대부분 터널 굴진면에서 발생되고 있으며, 붕괴의 가장 큰 요인은 용수나 단층대 등과 같은 지질구조와 관련이 있는 것으로 알려져 왔다. 따라서 터널 굴착시 터널 굴진면 전방의

지반상태를 사전에 파악하는 것은 터널의 안정성을 증가시키고 동시에 시공성을 향상시켜 경제적인 터널 시공을 위해 중요한 사항이다. 이러한 터널 굴진면 전방의 지반상태를 예측하는 방법은 크게 지구통계학적인 접근방법과 지구물리학적인 접근방법으로 구분된다. 지구통계학적인 접근방법은 주로 터널 굴착면 맵핑(face mapping) 자료 및 선진수평시추자료를 이용하여 각 굴진면 사이와 미시추공 사이의 지반상태를 통계학적으로 분석하는 방법이며, 지구물리학적인 방법은 터널 내 다수의 발진점 및 수진점에서 순차적으로 발생된 파동

¹⁾ 한국건설기술연구원 기반시설연구본부

* 교신저자 : kimky@kict.re.kr

접수일 : 2009년 10월 26일

심사 완료일 : 2009년 11월 23일

게재 확정일 : 2009년 12월 15일

(P파, S파)을 이용하여 굴진면 전방의 지반구조를 파악하는 터널 내 수평 탄성파 탐사법(Tunnel Seismic Prediction; TSP)이다. 하지만 상기 방법들은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

- 기존 터널에서 작성된 굴착면 맵핑 결과지의 분석결과에 의하면 대부분의 굴착면 관찰이 비전문가에 의해서 수행되고, 기재 내용의 양적, 질적 부족으로 인해 객관적이고 정량적인 지질정보를 획득하기 힘든 경우가 많다(김광염 외, 2006).
- 선진수평보링 및 TSP 탐사는 비용이 많이 들 뿐만 아니라 시공 중 별도의 작업시간을 마련해야 하며, 작업공간을 확보해야 하는 번거로움이 있다.

최근에는 재래식 공법(conventional tunnelling)이 적용된 터널 시공현장에서 정보화 시공기술의 일환으로 천공탐사를 굴진면 전방에 대한 지반 성상을 평가하는데 활용하려는 연구가 일부 시도되고 있다. 천공탐사는 NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법이 도입된 이래 산악터널의 시공에 있어 필수적으로 수행되는 공정인 천공 과정 중 계속되는 천공데이터를 이용하여 굴진면 전방의 지반성상을 평가하는 방법이다. 천공시 유압식 착암기로부터 얻어지는 천공데이터는 대상이 되는 지반의 특성에 직접적으로 관계하며, 시공의 효율에도 영향을 주는 우수한 지표로 활용될 수 있음이 선진국들의 연구사례를 통하여 밝혀지고 있다. Protodyakonov(1962)는 타격식 착암기의 천공성능평가를 위해 암석에 가해지는 타격력에 대한 반발저항을 측정하는 방법으로 암석강도지수(coefficient of rock strength; CRS) 시험을 제안하였다. 암석강도지수 시험법은 이 후 Paone et al.(1969), Tandanand 와 Unger(1975) 및 Rabia와 Brook(1980, 1981)에 의해 수정 제안되어 사용되었다. 특히 Paone et al.(1969) 및 Tandanand와 Unger(1975)는 암석강도지수와 일축압축강도와의 상관분석을 통해 천공시 타격과 암석강도의 관계를 단순화하여 사용하였다. 이 외에도 암석의 물리적·역학적 특성들과 천공속도의 상관성을 찾기 위한 연구가 많이 진행되었다(Selmer-Olsen과 Blindheim, 1970, Selim과 Bruce, 1970, Schmidt, 1972, Pathinkar와 Misra, 1976, Howarth et al., 1986, Thuro와 Spaun, 1996, Kahraman, 1999). Teale(1965)은 천공시 암반의 굴진능력을 평가하기 위해 천공에너지라는 개념을 제안하였다. 여기서, 천공에너지는 단위 체적의 암반을 제거하기 위해 소모되는 에너지로 정의하였다. 천공에너지는 그 개념이 보급되면서 여러 학자들에 의해 천공에너지를 구하는 식을 착암기의 기기량

과 암석의 물리적 특성 등의 인자를 활용하여 수정 제안하여 사용하고 있다(Rabia, 1982, 1985, Hughes, 1972, Mellor, 1972, Farmer와 Garrity, 1987, Pool, 1987, Sinkala, 1991). 일본의 경우 천공탐사시스템을 구축하기 위해 많은 연구 및 개발이 진행 중이며 이미 상용화되어 터널 시공에 적용하고 있다. 그 예들을 살펴보면, Toda 건설(2005)은 유압착암기의 천공데이터로부터 천공구간의 지반성상을 평가하는 시스템인 “산악터널 굴진면 전방 천공검사시스템(DRISS)”를 개발하였고, Mituisumitomo 건설(2005)은 천공 탐사를 시공 공정에 추가하여 록볼트공, 발파공에서 획득되는 막대한 양의 천공데이터를 효율적으로 처리하고, 시스템 전체를 자동화시키기 위해 천공데이터검층시스템을 개발하였다. 이러한 연구 결과는 굴진면전방의 지반상황을 정량적으로 예측 가능하며, 지반의 안정성과 지보패턴 등을 결정하는데 활용되고 있다. 그러나 국내의 천공데이터 관련 연구는 김낙영 외(2001)에 의해 수행된 바 있지만 선진국에 비해 기초적인 수준이다.

상기 언급한 국내외의 천공데이터 관련 연구들 중 아직 굴진면 전방의 지반특성 파악을 위한 정량적인 기준은 마련하지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 터널 천공시 획득되는 천공데이터를 이용하여 굴진면 전방의 암반강도를 예측하고자 하였다. 이는 암반강도가 현장에서 암반분류 및 지보패턴 설계 등의 핵심인자로 가장 보편적으로 활용될 뿐만 아니라, 암반강도의 변화를 통해 굴진면 전방의 지반상태 변화를 예측하는데도 활용할 수 있기 때문이다. 이를 위해 본 연구에서는 다양한 강도 특성을 보이는 균질한 암석시험편을 대상으로 착암기 종류를 변화시켜가며 천공실험을 수행하였다. 더불어 계속된 천공데이터의 분석을 통해 터널 굴진면 전방의 암반강도를 예측할 수 있는 정량적 지표를 수립하였다.

2. 회전-타격식 착암기의 천공원리

천공과 발파로 굴착을 수행하는 재래식 공법의 터널에서 천공은 발파전 장약을 위해 필수적으로 수행되는 공정의 하나이다. 일반적으로 천공작업은 시공여건에 따라 회전식, 회전-타격 방식의 유압 착암기를 이용하여 수행된다. 터널 현장에서는 주로 회전-타격식 유압 착암기를 점보드릴 붐(boom)대에 장착하여 천공을 실시하며, 천공시 소요되는 시간은 점보드릴 붐대에 장착된 착암기의 종류에 따라 달라진다. 천공성능은 주로 천공속도에 의해 평가되며 착암기의 유압과 굴착면 전방에 분포하는 암석의 물리적·역학적 특성에 따라 큰 영

향을 받는다.

착암기에 작용하는 유압은 피드압(feed pressure), 타격압(percussive pressure), 회전압(torque pressure) 등으로 구분된다. 피드압은 착암기를 전진시키는데 작용하는 유압이며, 타격압은 착암기에 연결된 로드(rod)에 타격력을 전달하기 위해 착암기 내 피스톤의 왕복운동을 조절하는 압력이다. 또한 회전압은 천공 시 로드를 회전시켜 로드 말단부에 연결된 비트(bit)의 타격이 효율적으로 이루어지도록 작용하는 압력이다.

상기 압력 조건을 조정할 후 천공이 수행되는데, 천공 속도는 굴진면 전방의 지반상태 뿐 만 아니라 착암기의 제원에 따라 달라진다. 이는 착암기 자체가 천공 시 발휘할 수 있는 출력(impact power)이 다르기 때문이다. 이러한 출력은 다음 식과 같이 표현된다.

$$P = E_i \times f \tag{1}$$

여기서, P 는 출력, E_i 는 1회 타격에너지, f 는 타격빈도수를 나타낸다.

1회의 타격에너지는 다음 식과 같이 표현된다.

$$E_i = PP \times a^2 \times d = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \tag{2}$$

여기서, PP 는 타격압, a^2 은 피스톤 단면적, d 는 피스톤 스트로크(stroke) 길이, m 은 피스톤 질량, v 는 피스톤 속도이다.

일반적으로 동일 착암기 내에서는 피스톤 질량과 피스톤 속도가 일정한 값을 보이기 때문에 1회의 타격에너지가 동일하게 된다. 따라서 타격압이 증가 또는 감

소하면 피스톤 스트로크의 길이는 반비례하여 감소 또는 증가하게 된다. 또한 피스톤 속도는 일정하기 때문에 피스톤 스트로크의 길이와 타격빈도수는 정비례 관계에 있다. 이는 착암기 내에서 타격압이 증가하면 피스톤 스트로크의 길이가 짧아짐과 동시에 타격빈도수를 증가시켜 최종 출력을 증가시키게 된다.

3. 암석강도별 천공실험

암반의 강도특성은 암반구조물 및 지하구조물의 설계/시공 시 암반분류 및 지보패턴 설계 등을 위한 핵심인자로 활용된다. 이에 본 연구에서는 국내에서 산출되는 암석 중 균질하며 다양한 일축압축강도를 보이는 암석을 대상으로 모형시험편을 제작하여 천공실험을 수행하였다. 모형시험편은 강화도, 포천, 충주 및 익산에서 채취하여 그림 1과 같이 각 면의 길이가 1 m로 일정한 입방체 형태로 제작하였다. 일반적으로 천공시 자리잡기(collaring)가 수십 cm 정도 필요하기 때문에 균질한 암반일 경우 50 cm 이상 굴착시에는 안정된 천공데이터를 확보할 수 있게 된다. 본 실험에서는 시험 여건상 시험편의 측면에 구속압을 적용하기 어려웠기 때문에 자중에 의한 천공방향 구속만이 경계조건으로 작용하였다. 각 암석에 대한 실내실험결과와 석회암의 일축압축강도는 75 MPa, 대리암은 115 MPa, 포천 화강암은 170 MPa 그리고 강화 화강암은 250 MPa로 나타났다. 참고로 암석은 한국도로공사 암석분류 기준(1992)에 의해 2개 지역의 화강암은 경암으로 구분되며, 대리암은 보통암 그리고 석회암은 연암으로 구분된다. 암석시험편의 물리착역학적 특성을 정리하면 표 1과 같다. 실험 시 천공은 국내에서 상용화된 4기의 착암기(표 2)를 이용하여 타격압을 변화시켜가며 수행되었다. COP 1238 모델의 착암기는 타격압을 100 bar, 150 bar, 200 bar 및 230 bar로 조정하여 천공을 실시하였으며, COP 1638 모델의 착암기는 타격압을 100 bar, 130 bar, 150 bar 및 200 bar로 조정하여 천공을 실시하였다. COP 1838 모델의 착암기는 타격압을 100 bar, 150 bar, 200 bar 및 230 bar로 조정하여 천공을 실시하였으며, HL 560s 모델의 착암기는 타격압을 80 bar, 100 bar, 120 bar 및 150 bar로 조정하여 천공을 실시하였다. 천공 시 작용하는 유압 및 천공속도 등과 같은 천공데이터는 한국건설기술연구원에서 개발된 천공데이터 분석시스템(Drilling Data Assessment System; DDAS, 2008)을 이용하여 계측하였다. 천공데이터 분석시스템은 크게 속도센서, 유압센서 및 데이터 로거로 구분되며(그림 2), 다음과 같이 3단계로 구분되어 점보드릴에 장착된다(그림 3).

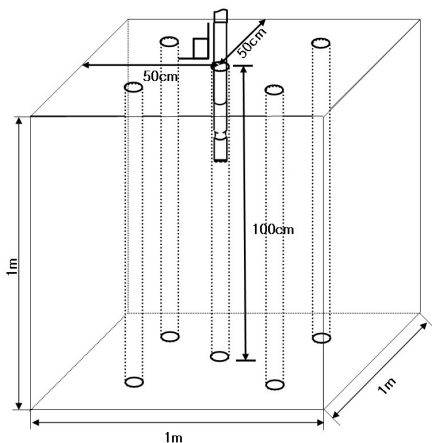


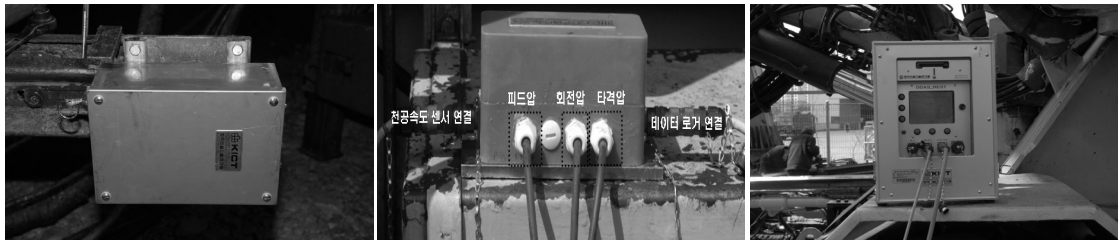
그림 1. 암석시험편 설계도 및 천공방향

표 1. 암석시험편의 물리적·공학적 특성

암석 종류	물리적·공학적 특성				
	일축압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	비중	흡수율 (%)	탄성파속도 (m/s)
화강암(강화)	250	13.5	2.60	0.35	4,380
화강암(포천)	170	8	2.59	0.34	3,980
대리암(충주)	115	7	2.83	0.13	4,300
석회암(익산)	75	4.7	2.73	0.08	4,570

표 2. 국내 가용 가능한 착암기 제원

Item	Unit	Atlas Copco			Tamrock
		COP 1238	COP 1638	COP 1838	HL 560S
Weight	kg	185	170	170	130
Length	mm	1048	1008	1008	1000
Width	mm	317	251	251	294
Height	mm	223	223	235	206
Height over drill center	mm	88	88	88	76
Impact frequency	Hz	52	60	60	59
Impact power	max.kW	12	16	18	16
Hydraulic pressure	max.bar	230	200	230	150
Flushing water consumption	l/min	66	66	66	40
Shank adapter	type	R32, R38, T38	R32, R38, T38	R32, R38, T38	R32
Borehole diameter	mm	45-105	33-76	38-76	43-57
Pressure of rotation motor	bar	150	175	210	175
Rotation torque	max.Nm	740/980	660/1000	500	400
Rotation speed	max.RPM	0-210/0-140	0-310/0-190	300	250



(a) 천공속도 센서

(b) 유압센서

(c) 데이터 로거

그림 2. 천공데이터 분석시스템 구성

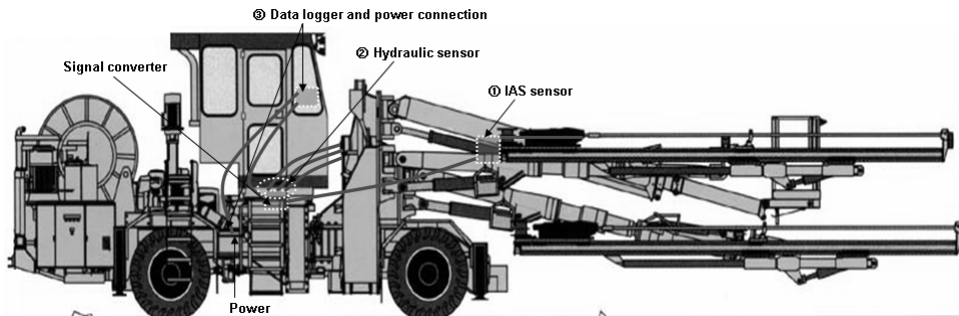


그림 3. Atlas Copco사 점보드릴에 장착된 천공데이터 분석시스템

- 1단계 - 먼저 속도센서 거치대를 볼대 뒤편에 장착을 하고 천공거리 센서와 연결된 고리를 착암기에 고정시킨다.
- 2단계 - 점보드릴에서 착암기로 전달되는 유압호스와 유압센서를 연결한다.
- 3단계 - 마지막으로 데이터 로거와 유압센서 및 점보드릴의 전원 공급장치와 연결한다.

비트는 국내 현장에서 가장 사용 빈도가 높은 Magnum SR35 모델의 구형 비트를 사용하였다. 해당 비트는 천공 시 대략 50 mm의 천공 홀을 생성시킨다(그림 4).

4. 실험결과

4.1 천공데이터 계측

Mituisumitomo 건설(2005)은 회전압과 피드압의 비로서 표현되는 회전저항을 이용하여 굴진면 전방의 암반강도를 추정하는 인자로서 활용하였다. 하지만 회전-타격식 착암기에서의 굴착은 타격에 주로 의존하고 회전은 타격의 효율성을 높이기 위해 타격위치를 적절하게 조정하는 부수적인 역할을 한다. 또한 천공데이터 중 회전압은 착암기의 종류, 암반강도 등의 특성에 따라 불규칙하게 변화하고 피드압은 비교적 일정하게 유지된다. 김광염 외(2008)의 연구결과에 의하면 회전압은 다른 천공데이터들과 비교하였을 때 가장 상관성이 낮은 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서는 타격압과 천공속도를 암반강도와 가장 밀접한 관계에 있는 것으로 가정한 후 해당 인자들에 대해서 정밀한 계측을 실시하였다. 암반강도에 따른 천공 실험결과 천공데이터는 착암기의 종류에 따라 변화하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 일축압축강도의 암석에 대해 천공 시 타격

압이 증가하면 천공속도는 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 여기서, 천공속도는 다른 천공데이터들과 구별하여 착암기의 종류 및 암석의 강도에 따라 고유한 값을 보이는 것으로 나타났다(표 3~표 6, 그림 5~그림 8). 이러한 결과는 현장에서 천공데이터를 계측할 경우 해당 착암기의 제원과 타격압을 파악하면 천공속도를 이용하여 굴진면 상의 천공 홀(hole) 시작 위치에서 천공방향으로의 암반의 강도를 예측할 수 있음을 의미한다.

4.2 상관성 분석

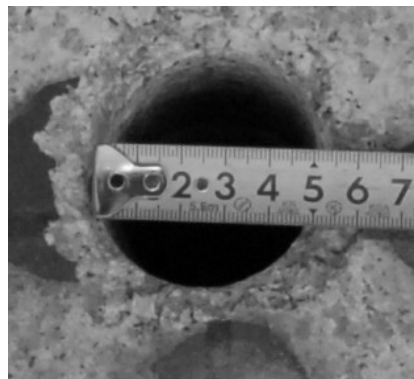
일반적으로 타격압이 증가하면 타격수 및 타격에너지는 정비례하여 증가한다. 또한 이론적으로 타격에너지가 증가하면 천공속도는 정비례하여 증가한다. 이러한 이론을 바탕으로 본 연구에서 계측된 타격압과 천공속도는 선형의 상관관계를 보인다고 가정하여 선형 회귀 분석을 실시하였다. 본 연구에서 착암기 종류 및 암석 강도의 변화에 따라 계측된 타격압과 천공속도의 선형 회귀분석결과를 통해 도출된 상관관계는 그림 5~그림 8에 나타나 있으며, 상관계수는 모든 착암기에 대해 0.95 이상의 높은 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다.

4.3 굴진면 전방 암반강도 예측 방법 제안

본 연구에서는 천공실험을 통해 획득된 타격압과 천공속도의 선형 회귀분석결과를 토대로 굴진면 전방의 암석강도를 예측하는 방법을 개발하였다. 이를 위해 먼저 착암기 종류에 따라 회귀분석을 통해 도출된 암석강도별 선형 회귀식의 기울기 평균값을 각 착암기의 고유계수로 설정하였다. 또한, 동일 타격압시 암석강도가 천공속도와 반비례 관계에 있다는 사실에 근거하여 고유계수를 통해 보정된 타격압-천공속도 회귀식의 절편과



(a) Magnum SR35 모델의 구형 비트



(b) 천공 홀 직경

그림 4. 천공실험시 사용된 비트 및 천공실험 후 천공 홀 직경

표 3. COP 1238 모델로 예측된 평균 천공속도

암종	일축압축강도 (MPa)	타격압 (bar)	평균 천공속도 (m/min)
화강암(강화)	250	100	1.1
		150	1.3
		200	1.6
		230	1.7
화강암(포천)	170	100	1.2
		150	1.6
		200	1.7
		230	1.9
대리암(충주)	115	100	1.6
		150	1.7
		200	2.1
		230	2.3
석회암(익산)	75	100	1.7
		150	1.8
		200	2.2
		230	2.6

표 4. COP 1638 모델로 예측된 평균 천공속도

암종	일축압축강도 (MPa)	타격압 (bar)	평균 천공속도 (m/min)
화강암(강화)	250	100	0.8
		130	1.3
		150	1.4
		200	2.0
화강암(포천)	170	100	2.2
		130	3.1
		150	3.4
		200	4.5
대리암(충주)	115	100	2.7
		130	3.2
		150	3.9
		200	5.2
석회암(익산)	75	100	2.8
		130	3.8
		150	4.8
		200	6.1

표 5. COP 1838 모델로 예측된 평균 천공속도

암종	일축압축강도 (MPa)	타격압 (bar)	평균 천공속도 (m/min)
화강암(강화)	250	100	1.1
		150	1.4
		200	2.2
		230	2.5
화강암(포천)	170	100	2.1
		150	3.5
		200	4.2
		230	4.6
대리암(충주)	115	100	2.8
		150	3.7
		200	5.2
		230	5.8
석회암(익산)	75	100	3.0
		150	4.2
		200	5.7
		230	6.7

표 6. HL 560s 모델로 예측된 평균 천공속도

암종	일축압축강도 (MPa)	타격압 (bar)	평균 천공속도 (m/min)
화강암(강화)	250	80	0.6
		100	1.1
		120	1.3
		150	1.6
화강암(포천)	170	80	0.8
		100	1.2
		120	2.0
		150	2.5
대리암(충주)	115	80	1.2
		100	1.6
		120	2.1
		150	2.9
석회암(익산)	75	80	1.7
		100	1.9
		120	2.5
		150	3.1

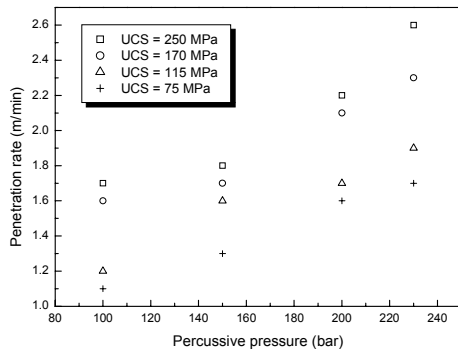


그림 5. 암석강도별 타격압과 천공속도 결과(COP 1238)

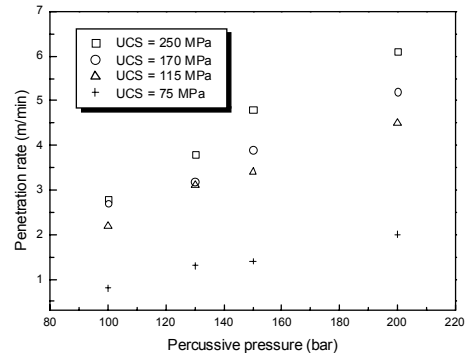


그림 6. 암석강도별 타격압과 천공속도 결과(COP 1638)

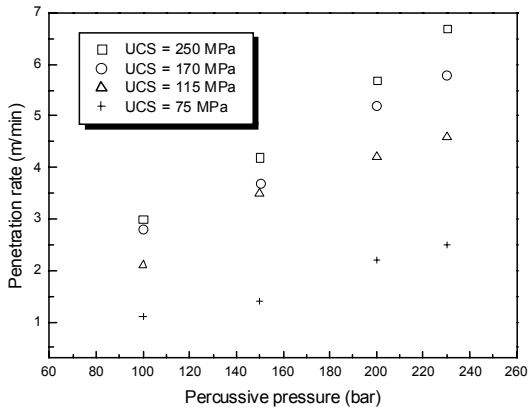


그림 7. 암석강도별 타격압과 천공속도 결과(COP 1838)

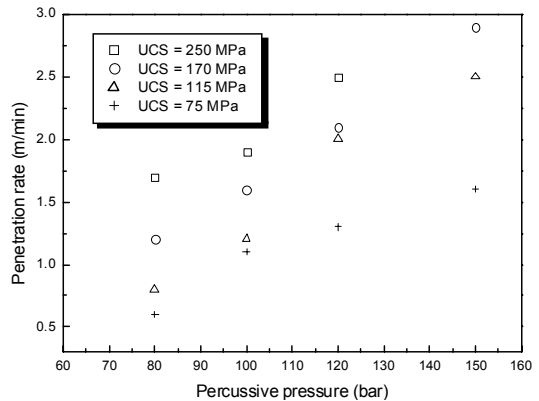


그림 8. 암석강도별 타격압과 천공속도 결과(HL 560s)

암석강도와의 상관성을 분석하였다(표 7~10). 이를 통해 도출된 착암기별 암석강도의 예측식은 다음과 같다.

- COP 1238에 대한 암석강도 예측식

$$UCS_{cop1238} = (0.0055625 PP - PR + 1.3955)/0.00384 \quad (3)$$

- COP 1638에 대한 암석강도 예측식

$$UCS_{cop1638} = (0.0232525 PP - PR + 2.37706)/0.01671 \quad (4)$$

- COP 1838에 대한 암석강도 예측식

$$UCS_{cop1838} = (0.02064 PP - PR + 2.86301)/0.01772 \quad (5)$$

- HL 560s에 대한 암석강도 예측식

$$UCS_{HL560s} = (0.0210975 PP - PR + 0.34639)/0.00637 \quad (6)$$

여기서, UCS(Rock Strength, MPa)는 암석강도, PP(Percussive Pressure, bar)는 타격압, PR(Penetration Rate, m/min)은 천공속도이다.

상기 예측식을 적용하여 착암기 종류에 따라 예측된 암반강도와 실측된 암반강도를 비교한 결과 상관계수는 모든 착암기에 대해 0.93 이상의 값을 보였다(그림 9).

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 터널 굴진면 전방에 분포하는 암반의 강도를 예측하는 기법을 마련하기 위하여 다양한 암반 강도를 보이는 모형시험편을 제작하여 천공실험을 수행하였다. 천공실험을 통해 획득된 천공데이터는 상관성 분석을 통해 암반강도를 정량적으로 예측하는 기법을 마련하는데 사용하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과

들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 천공속도는 다른 천공데이터들과 구별하여 착암기의 종류 및 암석의 강도에 따라 고유한 값을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 암석에 대해 천공시 타격압이 증가하면 천공속도는 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 타격압과 천공속도의 관계가 이론적으로 선형의 상관관계를 나타내기 때문에 본 연구에서 계측된 타격압과 천공속도의 관계를 선형 회귀분석을 실시하여 상관성을 분석하였다. 회귀분석결과 타격압과 천공속도는 모든 착암기 종류에 대해서 상관계수 R값이 0.95이상으로 나타나 높은 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다.
- 3) 선형 회귀분석결과를 바탕으로 평균기울기 값을 적용하여 최종 암반강도 예측식을 완성하였다. 해당식을 적용하여 착암기 종류에 따른 예측된 암반강도와 실측된 암반강도를 비교한 결과 상관계수 R은 모든 착암기에 대해 0.93 이상의 값으로 나타나 높은 상관관계가 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 터널 굴진면 전방의 암반강도 예측방법은 암석의 불균질성, 이방성 등의 강도에 영향을 미치는 요소를 가능한 배제하기 위해 표준 균질 시험편을 이용한 천공실험을 토대로 구축된 연구결과이다. 또한, 시험편 천공시 측면부를 구속하지 않은 상태에서 천공 데이터를 취득하였기 때문에 구속압의 변화나 측압계수 등의 영향은 고려하지 못하였다. 따라서 실제 터널 등의 현장에서 상기 예측식을 적용하기 위해서는 다양한 현장 실험을 통한 고유계수의 보정 등이 필요할 것으로 판단된다.

표 7. 평균 기울기를 적용하여 도출된 보정식(COP 1238)

구분	암석강도별 타격압 및 천공속도							
	75 MPa		115 MPa		170 MPa		250 MPa	
	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)
1	100	1.7	100	1.6	100	1.2	100	1.1
2	150	1.8	150	1.7	150	1.6	150	1.3
3	200	2.2	200	2.1	200	1.7	200	1.6
4	230	2.6	230	2.3	230	1.9	230	1.7
Σ	680	8.3	680	7.7	680	6.4	680	5.7
Σ/n	$\bar{X}=170$	$\bar{Y}=2.075$	$\bar{X}=170$	$\bar{Y}=1.925$	$\bar{X}=170$	$\bar{Y}=1.6$	$\bar{X}=170$	$\bar{Y}=1.425$
보정식	PR = 0.0055625PP+1.129375		PR = 0.0055625PP+0.979375		PR = 0.0055625PP+0.654375		PR = 0.0055625PP+0.479375	

표 8. 평균 기울기를 적용하여 도출된 보정식(COP 1638)

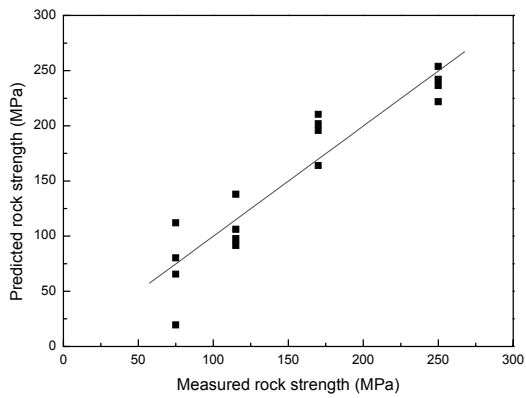
구분	암석강도별 타격압 및 천공속도							
	75 MPa		115 MPa		170 MPa		250 MPa	
	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)
1	100	2.8	100	2.7	100	2.2	100	0.8
2	130	3.8	130	3.2	130	3.1	130	1.3
3	150	4.8	150	3.9	150	3.4	150	1.4
4	200	6.1	200	5.2	200	4.5	200	2.0
Σ	580	17.5	580	15	580	13.2	580	5.5
Σ/n	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=4.375$	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=3.75$	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=3.3$	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=1.375$
보정식	PR = 0.0232525PP+1.003388		PR = 0.0232525PP+0.378388		PR = 0.0232525PP-0.07161		PR = 0.0232525PP-1.99661	

표 9. 평균 기울기를 적용하여 도출된 보정식(COP 1838)

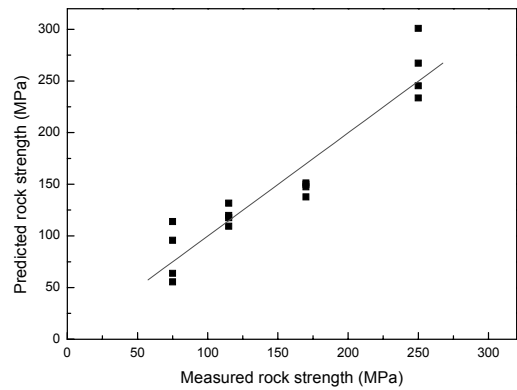
구분	암석강도별 타격압 및 천공속도							
	75 MPa		115 MPa		170 MPa		250 MPa	
	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)
1	100	3.0	100	2.8	100	2.1	100	1.1
2	150	4.2	130	3.7	130	3.5	130	1.4
3	200	5.7	150	5.2	150	4.2	150	2.2
4	230	6.7	200	5.8	200	4.6	200	2.5
Σ	680	19.6	580	17.5	580	14.4	580	7.2
Σ/n	$\bar{X}=170$	$\bar{Y}=4.9$	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=4.375$	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=3.6$	$\bar{X}=145$	$\bar{Y}=1.8$
보정식	PR = 0.02064PP+1.3912		PR = 0.02064PP+0.8662		PR = 0.02064PP+0.0912		PR = 0.02064PP-1.7088	

표 10. 평균 기울기를 적용하여 도출된 보정식(HL 560s)

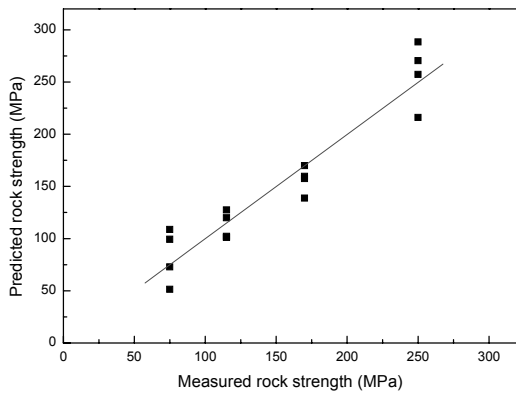
구분	암석강도별 타격압 및 천공속도							
	75 MPa		115 MPa		170 MPa		250 MPa	
	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)	PP(bar)	PR(m/min)
1	80	1.7	80	1.2	80	0.8	80	0.6
2	100	1.9	100	1.6	100	1.2	100	1.1
3	120	2.5	120	2.1	120	2.0	120	1.3
4	150	3.1	150	2.9	150	2.5	150	1.6
Σ	450	9.2	450	7.8	450	6.5	450	4.6
Σ/n	$\bar{X}=112.5$	$\bar{Y}=2.3$	$\bar{X}=112.5$	$\bar{Y}=1.95$	$\bar{X}=112.5$	$\bar{Y}=1.625$	$\bar{X}=112.5$	$\bar{Y}=1.15$
보정식	PR = 0.0210975PP-0.07347		PR = 0.0210975PP-0.45347		PR = 0.0210975PP-0.74847		PR = 0.0210975PP-1.22347	



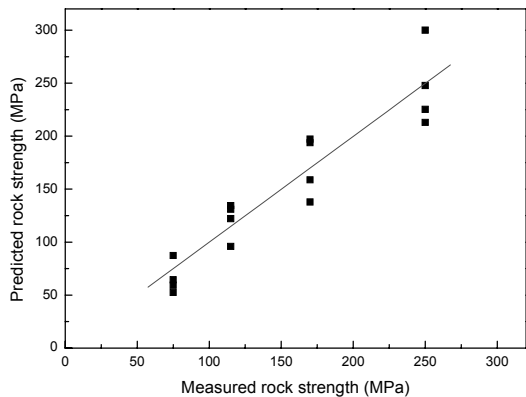
(a) COP 1238



(b) COP 1638



(c) COP 1838



(d) HL 560s

그림 9. 착암기 종류별 예측된 암석강도와 실측된 암석강도의 비교

사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시

공기기술개발(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김광염, 김창용, 김광식, 2008, 균질암반에서의 유압식 천공데이터 평가, 한국암반공학회, Vol. 16, No. 6, pp. 480-490.
2. 김광염, 김창용, 임성빈, 윤현석, 서용석, 2006, 국내 터널 시공 중 막장지질조사의 문제점 및 개선방안에 관한 연구, 대한지질공학회, Vol. 16, No. 3, pp. 265-273.
3. 김낙영, 김성환, 정형식, 2001, 도로터널에서 지보패턴별 굴착지수 상관관계 고찰, 한국터널공학회 터널기술논문집, Vol. 3, No. 14, pp. 17-24.
4. 한국도로공사, 1992, 도로설계요령, 제 4권 터널편.
5. Farmer IW, Garrity P., 1987, Prediction of roadheader cutting performance from fracture toughness considerations. In: Herget G, Vongpaisal S, editors. Proceedings of the Sixth International Congr Rock Mechanics, pp. 621-624.
6. Howarth DF, Adamson WR, Berndt JR., 1986, Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. Int J Rock Mech Min Sci, 23, pp. 171-175.
7. Hughes H., 1972, Some aspects of rock machining. Int J Rock Mech Min Sci, 9, pp. 205-211.
8. Kahraman S., 1999, Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. Int J Rock Mech Min Sci, 36, pp. 981-989.
9. Mellor M., 1972, Normalization of specific energy values. Int J Rock Mech Min Sci, 9, pp. 661-663.
10. 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.
11. Paone J, Madson D, Bruce WE., 1969, Drillability studies-laboratory percussive drilling. USBM RI 7300.
12. Pathikar AG, Misra GB., 1976, A critical appraisal of the protodyakonov index. Int J Rock Mech Min Sci, 13, pp. 249-251.
13. Pool D., 1987, The effectiveness of tunnelling machines. Tunn Tunnel, pp. 66-67.
14. Protodyakonov MM., 1962, Mechanical properties and drillability of rocks. In: Proceedings of the Fifth Symposium on Rock Mechanics. Minneapolis, MN: University of Minnesota, pp. 103-118.
15. Rabia H, Brook N., 1980, An empirical equation for drill performance prediction. The state of the arts in rock mechanics. In: Proceedings of the 21st US Symposium on Rock Mechanics. Columbia, MO: University of Missouri-Rolla, pp. 103-111.
16. Rabia H, Brook N., 1981, The effects of apparatus size and surface area of charge on the impact strength of rock. Int J Rock Mech Min Sci, 18, pp.211-219.
17. Rabia H., 1982, Specific energy as a criterion for drilling performance prediction. Int J Rock Mech Min Sci, 19, pp. 39-42.
18. Rabia H., 1985, A unified prediction model for percussive and rotary drilling. Min Sci Technol, 2, pp. 207-216.
19. Schmidt RL., 1972, Drillability studies-Percussive drilling in the field. USBM RI 7684.
20. Selim AA, Bruce WE., 1970, Prediction of penetration rate for percussive drilling. USBM RI 7396.
21. Selmer-Olsen R, Blindheim OT., 1970 On the drillability of rock by percussive drilling. In: Proceedings of the Second Congress International Society on Rock Mechanics, pp. 65-70.
22. Sinkala T., 1991, Improving hole quality by automatic control of the drilling process: theoretical and field studies. Min Sci Technol, 12, pp. 79-88.
23. Tandanand S, Unger HF., 1975, Drillability determination-A drillability index of percussive drills. USBM RI 8073.
24. Teale R., 1965, The concept of specific energy in rock drilling. Int J Rock Mech Min Sci, 2, pp. 57-71.
25. Thuro K, Spaun G., 1996, Introducing the 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunnelling. In: Barla M, editor. Eurock'96 Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 2, pp. 707-713.
26. 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 영

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시
스템공학부 박사
Tel: 031-910-0225
E-mail: kykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 기반시설연구
본부 지반연구실 선임연구원



김 성 권

2007년 충북대학교 자연대학 지구환경
과학과 이학사
2009년 충북대학교 자연대학 지구환경
과학과 이학석사
Tel: 031-910-0775
E-mail: geologist302@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 기반시설연구
본부 지반연구실 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 기반시설연구
본부 지반연구실 책임연구원



김 광 식

2004년 충북대학교 자연대학 지구환경
과학과 이학사
2006년 충북대학교 자연대학 지구환경
과학과 이학석사
Tel: 031-910-0237
E-mail: kwangks@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 기반시설연구
본부 지반연구실 연구원