유압식 착암기를 이용한 암반 굴착용이도 평가

Assessment of Rock Excavability using Hydraulic Drilling Machine

김광염, 김광식, 김창용, 장수호(한국건설기술연구원)

1. 서론

천공파라미터들을 이용한 막장전방 탐사기술인 천공탐사는 점보드릴의 유압착암기에 유압센서 및 데이터 레코더를 부착하여 암반 천공시 천공속도(instantaneous advance speed), 회전압(torque pressure), 타격압(percussion pressure), 피드압(feed pressure), 회전속도(rotation speed), 타격수 등의 다양한 천공파라미터를 측정하고 측정된 변화량을 분석하여 전방의 지반상태를 사전에 예측하고 평가하여 공사의 효율성을 증대시키고 시공 중 안전성을 향상시킬 수 있는 기법이다(Peck and Vynne, 1993; Pfister, 1985; Schunnesson, 1996; Toda 건설, 2005; Mutsuisumito 건설, 2005). 이러한 천공탐사를 통해 계측되는 천공파라미터들은 지반의 풍화정도, 파쇄정도(Barr, 1984), 연경정도(Shunnesson and Sturk, 1997), 암종의 경계(Shunnesson and Holme, 1997) 등의 지반에 대한 정량적인 정보를 내포하고 있다. 국외에서는 천공파라미터들과 암석, 암반, 지반 등에 관한 관계 규명을 통해 터널 시공 효율을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되어져 왔다. Kahraman(2000)과 Hoseinie(2008)은 천공속도와 암석 특성들과의 관계 규명을 통해 천공속도를 예측할 수 있는 천공용이도 지수(drillability index)를 제안하였다. Thuro(1997, 2003)는 천공파라미터를 이용하여 천공용이도(drillability)에 대한 개념과 암종별 천공용이도에 대한 암반 분류를 제시하였고, 굴착용이도(excavatability)의 제안을 통해 천공속도와 상관성이 있는 변형에너지(destruction energy)와 체적당 화약소비량에 대한 관계를 연구하였다. 국외의 천공데이터에 관한 연구 결과들은 천공파라미터들을 이용해 암석, 암반의 정보를 신속하고 정량적으로 평가하였지만 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 계측된 천공파라미터는 직접적으로 천공에 대한 지반의 반응을 측정하는 것이 아니고, 천공시 사용된 유압착암기의 기계량을 측정하게 된다. 그러므로 측정된 기계량에 대한 정량적인 의미부여에 모호한 점이 많고, 측정해야 하는 유압착암기의 기계량 항목 선정 및 정확한 지반평가를 위한 천공데이터의 수치화가 명확하지 않다는 단점을 가지고 있다. 천공데이터를 활용한 암석 및 암반을 평가하는 연구는 지질 특성(암종, 불연속면, 단층대, 파쇄대 등), 천공장비특성(장비성능, 유압착암기의 특성, 천공장비 제어시스템 등), 장비 조작자의 조작법(천공방법, 장비의 유지 및 조작)등의 다양한 인자들에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 연구는 천공작업 수행시 유압식 착암기에서 계측되는 천공데이터를 활용하여 국내 지반에 적용할 수 있는 천공데이터 분석 시스템 개발이 목적이며, 현재 연구가 진행중인 DDAS 개발을 위해 선행적으로 연구되어야 할 유압식 착암기의 천공메커니즘 분석, 천공데이터 관련 연구의 소개와 굴착용이도 평가 연구

에 관한 연구 내용과 연구방안을 소개하고자 한다.

2. 천공데이터 분석 시스템 개발

현재 개발 진행 중인 신속 정량화 지반평가 시스템인 DDAS는 Data Drilling System, DB 모듈, Drilling Data Analysis System으로 구성되어 있다. 그림 1은 DDAS의 개요를 나타내고 있다. Data Drilling System은 점보드릴에 센서를 장착하여 천공시 드릴 로드에 가해지는 피드압, 회전압, 타격압과 드릴로드의 굴진속도인 천공속도 등의 천공데이터를 계측 및 수집한다. Drilling data Analysis System은 천공데이터의 정보처리 기능 및 데이터베이스와 현재의 지반상태를 분석한다. DB 모듈은 현장자료의 천공데이터와 지반정수의 상관관계, 지보패턴, 발파 인자 등을 데이터베이스화 한다.

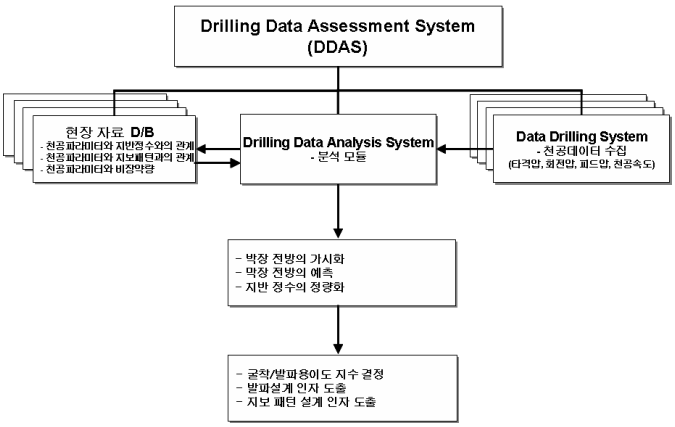


그림 1. DDAS 구성 모식도

국외의 연구결과들을 살펴보면 암반의 굴착용이도는 발파용이도 결정과 터널 시공시 발파설계 및 지보패턴 설계에 필요한 인자들을 도출하고 있다. 따라서 본 연구에서는 DDAS를 통해 대상 암반의 굴착용이도 결정을 목표로 하고 있다. DDAS 개발을 위한 연구는 그림 2와 같이 계획되었고, 진행하고 있다. 그런데 굴착용이도에 대한 연구는 우선적으로 천공파라미터 연구, 천공장비 특성 연구가 선행되어져야 한다. 이는 천공데이터가 직접적인 천공에 대한 지반의 반응을 계측하는데 목적을 두지 않고, 천공시 사용된 유압착암기의 기계량만을 측정하기 때문에 측정된 기계량에 대한 정량적인 의미부여에 모호한 점이 많고, 측정해야 하는 유압착암기의 기계량 항목 및 정확한 지반평가를 위한 천공데이터의 수치화가 명확하지 않다는데 문제가 있다. 또한 국내의 경우 천공데이터 관련 연구가 거의 이루어져 있지 않으므로 실제 계측된 천공데이터가 지반특성과 관계가 있는지에 대한 검증이 필요하고 천공파라미터들의 선정 및 천공장비 특성에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 굴착용이도 평가 연구가 천공장비특성 연구, 천공데이터 연구 및 암석 특성 실험들과 상호 유기적으로 진행되어야하지만, 본 연구에서는 굴착용이도 연구 보다 먼저 천공데이터 분석 연구, 천공장비 특성 연구를 수행하였다.

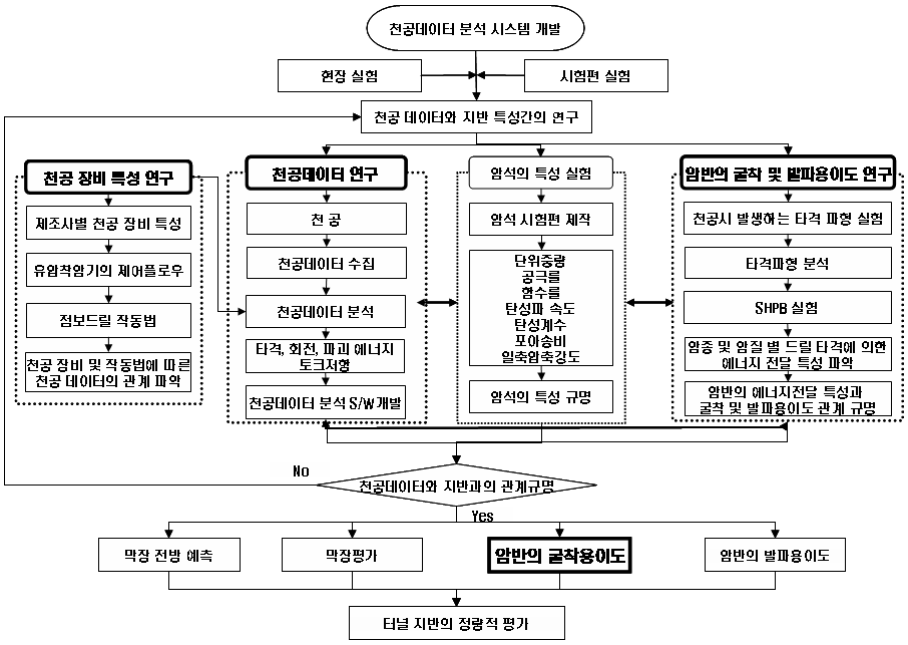


그림 2. DDAS 개발 연구 흐름도

3. 암반 굴착용이도 평가를 위한 선행 연구들

2.1 천공데이터 연구

암반 천공시 유압식 착암기에서 계측되는 천공데이터들은 기존 연구를 통해 암반의 암석학적, 지반공학적, 지질학적 정보가 내포하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 천공데이터를 이용하여 정확한 지반의 특성을 평가하기 위해서는 계측된 천공파라미터들 중 단일 천공파라미터만을 이용하여 지반의 상태를 정확히 예측하고 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 천공데이터를 이용한 지반평가는 계측된 각각의 천공파라미터들의 조합 및 천공파라미터들 간의 분석을 통해 이루어져야한다(Shunnesson, 1998; Scoble, Peck and Hendricks, 1989; Kim, 2007). 표 1은 계측된 천공파라미터들의 조합을 통해 지반특성들과의 관계를 나타낸 결과이다.

표 1. 천공파라미터들과 지반상태와의 관계(Kim, 2007)

지반상태 / 천공패러미터	재밍현상 및 롯드교체	암반의 연경정도		RQD		절리 및 파쇄대	연약대
		연약할 경우	단단할 경우	증가할 경우	감소할 경우		
타격압 (bar)	감소	일정	일정	일정	일정	감소	일정
회전압 (bar)	감소	감소	증가	감소	증가	감소 또는 증가	일정 또는 감소
천공속도 (m/h)	감소	증가	감소 또는 증가	일정 또는 감소	증가	증가	증가

천공데이터와 암석 특성들과의 관계를 분석하여 암반 굴착용이도를 평가하기 위해서는 천공파라미터들에 대한 선정이 중요하다. 암반 굴착용이도 평가를 위해 이용된 천공파라미터의 선정은 유압식 착암기의 천공메커니즘을 고려하여 선택하였다. 점보드릴의 유압식 착암기를 이용한 굴착은 타격 굴착을 기본으로 하고 있으며, 그림 3은 유압식 착암기의 천공 모식도이다. 점보드릴의 유압식 착암기에 연결된 로드(rod)와 버턴비트(button bit)는 유압식 착암기의 타격, 회전 피드(feed)에 의해 암반 굴착에 필요한 에너지를 전달한다. 점보드릴의 로드에 연결된 버턴비트의 타격으로 인해 접촉한 암반은 파쇄 및 암편화 된다. 타격에 의해 암편화된 암반은 비트의 회전에 의해 분쇄되고, 천공홀 밖으로 배출되어 공입구까지 운반된다. 또한 이 회전에 의해 버턴비트는 새로운 타격위치로 자리를 잡고 다음 천공작업의 준비가 이루어진다. 타격 및 회전이 유효하게 작용하기 위해서는 암반에 비트가 확실히 밀착될 필요가 있으며, 이것은 피드에 의해 암반에 비트를 밀착시키며 새로운 암반을 타격하여 굴착이 이루어지게 된다. 그러므로 유압착암기의 천공속도는 타격에 의해 암반을 파쇄하는 능률과 파쇄된 암반을 배출하는 능률에 의해 결정되어진다. 그러나 후자의 영향은 매우 작으며, 천공속도는 타격능력에만 의존한다는 것이 일반적이다. 또한 가장 빠른 천공속도와 유압착암기의 성능에 대한 관계를 정식화한 문헌(Tamrock, 1993)에서도 타격 능력에만 착안하고 있다고 기술하고 있다. 유압식 착암기의 천공메커니즘 분석을 통해 선정된 천공파라미터들은 타격압, 회전압, 피드압, 천공속도이다. 또한 실제 암반을 천공할 때 유압식 착암기에 의한 천공이 타격을 기본으로 굴착됨을 검증하기 위해 동일한 암종의 화강암 모형시험편(1m×1m×1m)을 제작하여 천공실험을 수행하였다. 천공실험을 통해 계측된 천공파라미터들은 타격압, 회전압, 피드압, 천공속도이며, 이들 상호간의 상관관계를 분석한 결과 표 2와 같다. 표 2의 결과는 타격압과 피드압이 천공속도와 높은 상관관계를 나타냈다. 이를 통해 유압착암기의 굴착은 타격능력에 의해 지배됨을 확인할 수 있었다.

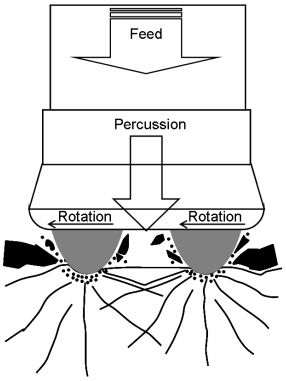


그림 3. 유압착암기의 천공 메커니즘

표 2. 천공파라미터들 간의 상관관계 분석 결과(Kim, 2008)

천공파라미터	천공속도	피드압	회전압	타격압
천공속도	1	0.938	0.322	0.958
피드압	0.938	1	0.516	0.976
회전압	0.322	0.516	1	0.556
타격압	0.958	0.976	0.556	1

계측된 천공파라미터들 만으로 다양한 암질의 암반의 특성을 정확히 평가하는 것은 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 기존 연구자들에 의해 제안된 천공능력을 대표하는 값인 천공에너지와 균열을 발달정도의 지표인 회전저항을 천공파라미터에 추가하였다. 천공에너지와 회전저항은 아래의 식으로 표현할 수 있다.

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

여기서, Tr : 회전저항, TP : 회전압[bar] FP : 피드압[bar]

$$E_d = \frac{E_p \times N_S}{A_R \times IAS} \qquad (2)$$

여기서, E_d: 천공에너지 [J/m^3], IAS : 천공속도[m/min], A_R : 천공 단면적[m^2], Ep : 피스톤 타격에너지[J], N_S : 피스톤 타격회수

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

여기서, a_p : 피스톤 단면적 [m^2], PP : 타격압 [bar], L_p : 피스톤 스트로크 [m]

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

여기서, N_S : 피스톤 타격회수, N : 타격수[Hz], l : 천공단위 깊이[m], IAS : 천공속도[m/min]

천공에너지와 회전저항은 천공탐사시 유압착암기에서 계측된 타격압, 회전압, 피드압, 천공속도를 이용하여 분석할 수 있으며, 천공에너지의 경우는 천공장비 특성을 파악하고 있어야 한다.

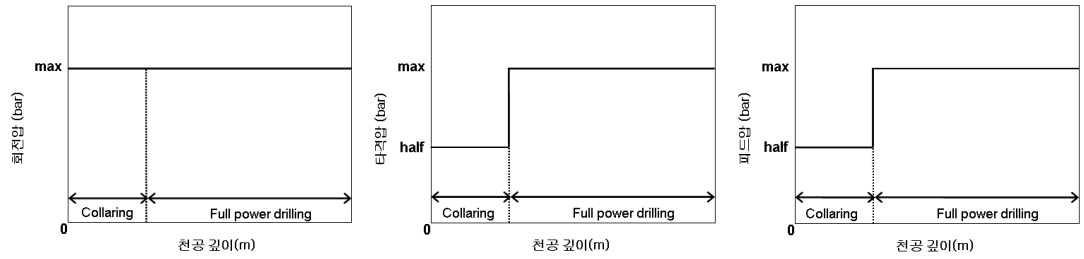
2.2 천공장비 특성 연구

현장에서 계측된 천공파라미터를 이용하여 지반상태를 해석하기 위해서는 천공장비에 대한 연구가 선행되어야 한다. 제조사별, 천공장비의 종류에 따라 각각 유압착암기의 설정유압값들과 천공성능이 달라지기 때문이다. 또한 지반특성, 천공장비의 조작, 천공장비 특성 등에 따라 굴착용이도와 높은 상관관계를 보이는 천공속도가 변하게 된다. 천공데이터 분석을 통해 구해지는 암반의 천공에너지는 천공장비 특성인 피스톤의 직경, 피스톤 스트로크, 천공홀의 크기, 회전수 등에 대한 정보를 필요로 한다. 그러므로 천공데이터를 이용한 지반평가 분석을 수행하기 위해서는 천공장비에 대한 연구가 필요하다.

2.2.1 점보드릴의 작동 특성

천공데이터 해석시 실제 지반 평가에 이용되는 천공데이터 값들의 범위는 천공장비의 조작 특성에 대해 알고 있어야 해석시 사용되는 천공데이터 값의 범위를 찾을 수 있다. 일반적으로 수동식 점보드릴의 경우 조작자는 회전압, 타격압, 피드압의 유압레버를 작동시켜 천공 작업을 수행한다. 이때 암반의 천공은 자리잡기(collaring)와 실제 암반 천공(full power drilling) 순으로 진행된다. 그러나 종종 자리잡기를 수행하지 않고, full power로 천공하는 경우가 발생하기 때문에 이러한 조작법을 알고 있어야 천공데이터를 해석 할 수 있다.

자리잡기는 비트가 천공할 정확한 위치를 잡기위해 회전압은 최대로 유지하고, 타격압과 피드압을 half 상태로 유지하여 약 20cm정도 암반을 천공하는 것을 말한다. 또는 새로운 암반을 천공 할 때 천공에 필요한 회전압, 타격압, 피드압의 최적 유압 값들을 설정해 주기 위해 천공 작업 전에 자리잡기를 수행한다. 여기서, half 상태는 최대 출력일 때 타격압과 피드압의 절반 정도의 유압을 의미한다. 암반 천공은 자리잡기가 끝났을 경우 점보기사의 판단에 의해 본래 점보장비가 설정되어 있는 타격압 및 피드압의 최대출력을 사용하여 암반을 천공하는 것을 말한다. 그림 4는 일반적으로 점보드릴의 조작자에 의해 암반을 천공할 때 각각의 유압들의 변화를 나타낸 것이다. 그러므로 천공데이터 분석에 이용되는 천공파라미터들의 값은 자리잡기가 끝난 full power로 천공되었을 때의 유압값을 이용하여 지반의 특성들을 분석하여야 한다.

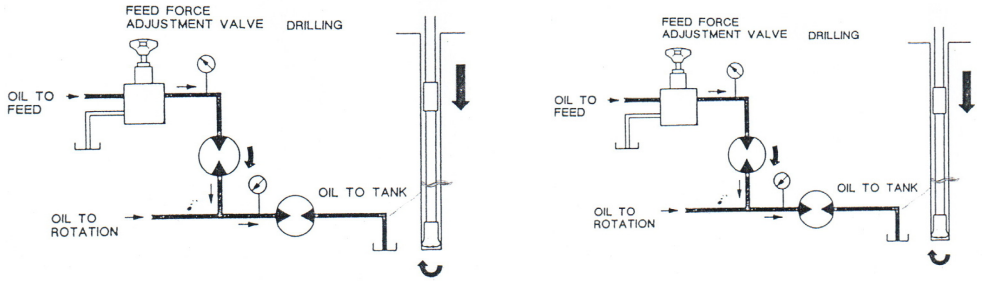


(a) 회전압 (a) 타격압 (c) 피드압

그림 4. 암반 천공시 유압착암기의 유압들의 변화

2.2.2 점보드릴의 제어시스템

천공데이터를 해석시 천공장비에 대한 제어시스템을 이해할 필요가 있다. 앞서 언급한 유압식 착암기의 메커니즘에 의해 천공이 이루어지면서 천공작업 동안 유압착암기는 과대한 부하를 받을 때가 많고, 기계의 내구성에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 천공장비를 보호하기 위해 제조사 별로 차이는 있지만 anti-jamming이란 제어시스템을 이용하여 장비를 보호해주고 있다. 그림 5는 Tamrock 사의 anti-jamming 제어 시스템을 나타낸 모식도이다. 높은 회전압에 의해 착암기 및 비트가 과열되면 자동으로 피드압을 줄여 착암기를 후퇴시켜 장비의 손상을 줄여준다.



(a) 천공중 회전압과 피드압의 관계 (b) Anti-Jamming시 피드압과 회전압의 관계

그림 5. Anti-Jamming automatics(Tamrock 사)

Atlas Copco 사의 제어 시스템은 그림 6과 같은 제어 흐름을 나타내고 있다. 그림 6에서 제어는 회전압의 신호를 근거로 이루어진다. 즉 설정 회전압이 85bar를 초과하면 회전압을 저하시키기 위해 비트를 제어하고 있던 피드압을 저하시킨다. 이때 피드압의 저하에도 회전압이 저하되지 않고 상승을 계속하는 경우에는 착암기 자체가 후퇴하고 과도한 부하로부터 유압착암기를 보호한다. 이 후퇴를 만드는 회전압은 일반적으로 80~85bar이다. 그러나 피드압을 저하시켜 회전압이 저하되었지만 피드압이 저하를 계속해서 회복되지 않는 경우 설정 피드압력이 55bar 이하가 되면 타격 모드가 저압 모드로 전이한다. 이것은 공의 훼손(슬라임이 끼거나, 공이 틀어지거나 등)이 심하기 때문에 천공을 계속하는 것보다 공 청소를 행하는 편이 작업상 효율적이라고 판단하는 것과 같은 의미이며 점토를 협재한 크랙이나 대규모 구조적인 연약선을 가정하여 설정된 제어이다. 고압의 타격 모들에서의 복귀는 설정 회전압 이하로 저하하고 연속해서 피드압이 설정치 이상으로 복귀할 때까지 계속된다. 즉 공의 거침(공내에서 거칠거칠하고 휘고 하는 것)이 해소되고 통상적인 천공이 가능하게 될 때 까지 계속된다.

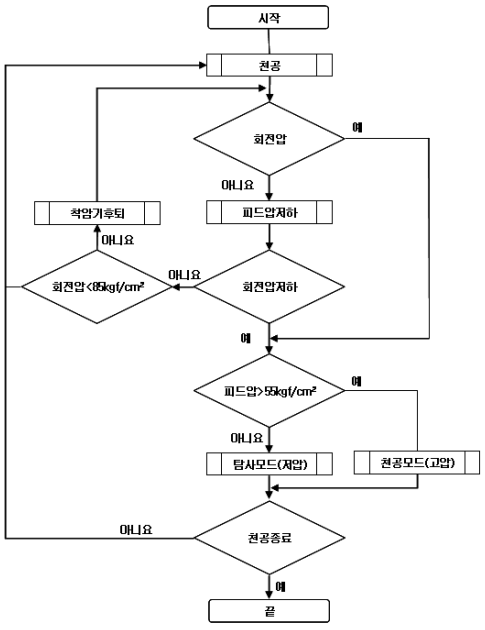


그림 6. 유압제어 흐름도(Atlas Copco 사)

2.2.3 유압착암기의 작동 특성과 지반과의 관계

천공장비 특성 분석을 통해 천공시 지반과의 기계량 데이터의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 점보드릴의 드리프터로부터 회전압의 상승은 암편화된 암을 배출할 때 과대한 부하가 생긴 것으로 판단할 수 있다. 이 부하의 원인은 단순히 지반의 연경만 아니라 협재하는 점토나 공벽의 붕락 등의 공 거침으로 예상되지만 이 두 경우에 다른 기계량 측정에 의해 분해하는 것이 가능하다고 생각한다.

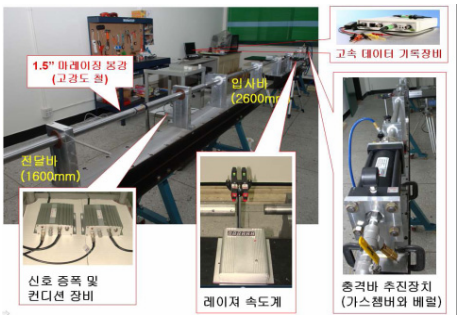
(2) 회전압으로부터 지반의 지질구조를 추정하려는 경우 유압착암기의 제어시스템에 의해 회전압의 상승이 정해져 있기 때문에 이 상한치까지의 폭으로 회전압에 대한 대비가 나타나는가를 검증해야만 한다.

(3) 저압모드 천공이 진행되는 구간은 암반을 천공한다는 것보다도 공저(공 밑바닥)의 분체나 슬러리를 배제하는 청소작업에 가깝고 공거침이 심한 지반에서 특유의 작업으로 판단 할 수 있다. 그러므로 이것이 면적 혹은 입체적으로 연속성을 갖고 분포하는 것이라면 이것을 지질구조상의 연약대로 판단 할 수 있다.

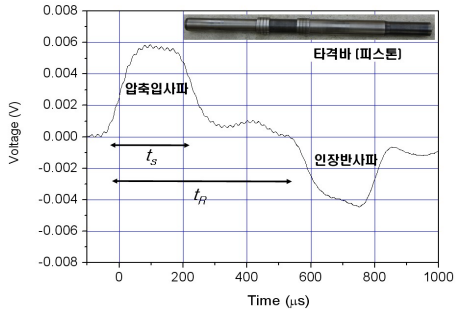
(4) 암석·암반의 연경에 관한 다른 하나의 지표로서 천공속도를 생각할 수 있지만 이 값은 각종 작업효율이 가미되기 때문에 반드시 지반의 지질특성과 양호한 상관을 얻을 수 있다고는 보장할 수는 없다.

4. 암반 굴착용이도 평가를 위한 연구

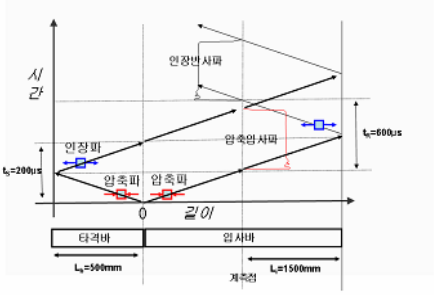
굴착용이도 평가를 위한 연구는 천공데이터와 지반과의 관계 규명을 위해 천공장비 특성 연구, 천공데이터 연구, 암석의 특성 실험 등을 통해 상호 유기적으로 수행하고 있다. 특히 굴착용이도 평가를 위한 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 실험은 암석에 따른 유압식 착암기의 충격관입 특성 및 천공성능을 보다 더 정밀하게 분석하기 위해서 수행되고 있다. SHPB실험 장비는 원리상 충격바를 고속으로 입사바에 충돌시켜 충격파를 발생시키는데, 이것은 점보드릴의 타격작용에 의한 충격력의 발생원리와 같다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 점보드릴의 타격파형 계측실험으로부터 충격파형을 얻었으며, 이를 주시곡선을 분석하여 데이터의 신뢰성을 검토하였다. 또한 정밀 SHPB 장비를 이용하여 계측된 충격파형은 파형의 모사를 통하여 암석에 대한 점보드릴의 천공성능 평가에 필용한 중요한 자료를 획득하였다. 그림 7은 정밀 SHPB를 이용하여 점보드릴의 타격파형을 재현한 결과를 보여준다. 따라서 암반 굴착용이도 평가를 위해서는 다양한 암종 및 암질에 대해서 DDAS의 현장 적용 및 시험편 실험을 통해 계측된 천공데이터 분석 결과와 SHPB 실험 결과를 분석하여 암반의 굴착용이도를 평가 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 정확한 지반 특성을 평가할 수 있는 천공데이터 연구가 필요하다.



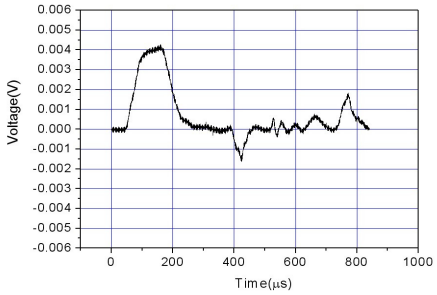
(a) 정밀 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)



(b) 점보드릴의 드릴로드에서 계측된 타격파형



(c) 주시곡선을 이용한 계측 타격파형의 분석



(d) SHPB 실험을 통해 재현된 점보드릴의 타격파형

그림 7. SHPB를 이용한 점보드릴의 천공성능 평가

5. 결론

본 논문에서는 신속·정량화 지반평가 시스템인 DDAS 시스템 개발과 관련된 유압식 착암기를 이용한 굴착용이도를 평가 할 수 있는 선행 연구들과 굴착용이도 연구방안에 대하여 소개하고자 하였다. 국외의 연구결과에 따르면 굴착용이도는 발파용이도 결정과 터널 시공시 발파설계 및 지보패턴 설계에 필요한 인자들을 도출해내고 있다. 현재 DDAS 개발은 진행 중에 있으며, 다양한 암질 및 암종에 대해 DDAS를 적용하여 암반의 굴착용이도 평가를 위한 연구를 계속 수행할 예정이다. 본 연구를 통해 유압착암기의 굴착용이도 연구를 위해서는 유압식 착암기의 천공메커니즘, 천공데이터 연구, 천공장비 특성 연구들이 선행되어야 하며, 앞선 연구가 제대로 진행되어야 정량적인 지반평가를 할 수 있는 굴착용이도 지수를 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다. 또한 다양한 암질 및 암종에 대한 현장 천공실험, 시험편 실험, 암석특성 실험, SHPB 등의 다양한 실험들을 수행한 결과들을 기초로 천공데이터들과 정확한 지반 특성들과의 관계 규명 통해 궁극적인 목표인 천공데이터를 활용한 막장전방 예측, 막장평가, 굴착/발파용이도를 이용한 다양한 국내 지반의 천공데이터 D/B화 구축으로 지반특성을 고려한 한국형 신속지반정보예측 시스템을 개발할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Barr, M. V., 1984, Instrumented horizontal drilling for tunnelling site investigations. Ph.D. thesis, Imperial College of Science and Technology, London, U.K.

2. Kahraman, S., Balc, 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.
3. 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.
4. K. Y. Kim, C. Y. Kim, K. S. Kim & H. K. Yoon, 2008, Relationship of drilling data and rock properties using drilling data acquisition system, World Tunnel Congress 2008, Vol. 1, pp. 155-163.
5. Mutsuisumito corporation, 2005, Tunnel rock mass evaluation that uses Drill-Logging system, pp. Proceedings of the 60th Symposium, Japan Society of Civil Engineers, pp. 9-10.
6. 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.
7. Pfister, P., 1985, Recording drilling parameters in ground engineering, Geodrilling, pp. 8-14.
8. Schunnesson, H., 1996, RQD predictions based on drill performance parameters, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 345-351.
9. Schunnesson, H. and Holme, K., 1997, Drill monitoring for geological mine planning in the Viscaria copper mine, Sweden. CIM Bull., 90, pp. 83-89.
10. Schunnesson, H. and Sturk, R., 1997, Drill Monitoring at the Hallandsås Project in Sweden, Research Report, Vol. 21, Lile University of Technology, Sweden.
11. Schunnesson, H., 1998, Rock characterisation using percussive drilling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 6. pp. 711-725.
12. Scoble, M. J., Peck, J. and Hendricks, C., 1989, Correlation between rotary drill performance parameters and Borehole geophysical logging, Mining Science and Technology, 8, pp. 301-312.
13. S. H. Hoseinie, H. Aghababaei, and Y. Pourrahimian, 2008, Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index(RDi), International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 45, pp. 1-10.
14. Tamrock, 1999, Rock excavation handbook for civil engineering, pp. 62-70.
15. Thuro K., 1997, Drillability prediction-geological influence in hard rock drill and blast tunneling, Geol. Rundsch. Vol. 86, pp. 426-438.
16. Thuro K., 2003, Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting : rock parameters for excavatability, ISRM-Technology roadmap for rock mechanics, pp. 1227-1234.
17. 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.