홉킨스바 타격시험을 통한 드릴비트의 암반파쇄 분석

권기범, 송창현, 박진영, 신대영, 조정우*, 조상호

Rock Fragmentation Assessment of a Drill Bit
by Hopkinson Bar Percussion TestKi-beom Kwon, Chang-heon Song, Jin-Young Park,
Dae-Young Shin, Jung-Woo Cho*, Sang-Ho Cho

Abstract The percussion rate and spacing of the button of drill bit are very important in maximizing the drilling efficiency. Therefore, a series of percussion tests using Hopkinson bar system was carried out to assess the fragmentation performance against the beat rate and spacing of a drill bit. First, single percussion test complemented with numerical simulation was performed to analyze rock fragmentation phenomenon and to describe the fragmentation process. Next, multiple percussion test that repetitively strike the rock sample moving at predetermined rate was carried out to predict drilling efficiency against the button spacing. After the tests, the fragmented volume of the rock was measured by laser scanner and the drilling performance was analyzed using the calculated percussive energy and measured negative volume. Based on the results, the single impact performance of drill bit with 102 mm diameter was predicted.

Key words Rock drill, Drill bit, Hopkinson bar, Drilling ability

초 록 천공 작업 시 드릴비트 버튼의 타격 속도와 타격 간격은 천공효율을 높이는데 있어 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 버튼의 타격 속도 및 간격에 따른 암반 파쇄성능을 분석하기 위하여 홉킨스바 시험기를 이용한 타격시험을 수행하였다. 먼저, 버튼의 타격속도에 따른 암석파쇄 현상을 분석하기 위하여 단일타격 시험을 수행하였고, 수치해석을 통해 단일 타격 시험에 대한 암석의 파쇄과정을 모사하였다. 다음으로 버튼의 타격 간격에 따른 천공효율을 예측하기 위하여 타격 후 설정된 거리만큼 암석 시료를 이동시키고 재차 타격하는 방식으로 다중타격 시험을 수행하였다. 타격시험 후 암석의 천공부피는 레이저 스캐너를 이용하여 측정하였으며, 타격에너지와 천공부피를 통해 천공성능을 계산하였다. 이러한 시험 결과를 바탕으로 직경 102 mm 드릴비트의 1회 타격 시 천공성능을 예측하였다.

핵심어 천공기, 드릴 비트, 홉킨스바, 천공성능

1. 서 론

천공기는 회전력과 충격력을 이용하여 암반에 구멍을 뚫는 장비이다. 이러한 천공기는 노천광산이나 토목공

사 현장에서 지표면을 천공하거나, 터널 또는 지하광산, 암벽 절개면 보강을 위한 천공용으로 주로 사용된다. 천공기의 부품 중 직접 암반을 타격하는 용도로 사용되는 부위는 드릴비트(drill bit)이다. 천공효율을 높이고 드릴비트의 마모를 줄이기 위해서는 암반 강도와 굴착 경, 작업환경에 따른 적절한 운용조건(피드압, 타격압, 타격수, 회전수)으로 천공 작업을 진행해야 한다(Atlas Copco, 2006). 하지만 지금까지는 현장 작업자의 경험에 의존하여 천공 작업을 진행하고 있는 실정이다.

천공작업과 관련된 그동안의 연구사례들을 살펴보면, Drill steel과 암반 사이의 에너지 전달 및 타격력에 따

Received: Jan. 9, 2013

Revised: Feb. 18, 2013

Accepted: Feb 18, 2013

*Corresponding Author: Jung-Woo Cho

Tel) +82536071102, Fax) +82536071120

E-Mail) chojw1665@gmail.com

Construction Equipment and Parts R&D Group, Korea
Institute of Industrial Technology, Gyeongsan-si, Korea

른 비에너지(Specific energy) 측정에 대한 연구(Hustruid & Fairhurst, 1971(a), 1971(b), 1972(a), 1972(b))가 있다. 또한 암반 종류 및 타격 속도에 따른 DTH(Down the hole) Hammer의 암반 파쇄 깊이 변화를 수치해석을 통해 규명한 연구(Bu 외, 2009), 유공압시스템 해석을 통해 DTH Hammer 및 드리프터(Drifter)의 타격 성능을 분석한 연구(신대영과 송창현, 2012, 오주영 외, 2011) 등이 있다. 또한 천공기의 암분유동해석을 통해 드릴비트의 내부유로를 최적화하는 연구도 수행된 바 있다(송창현 외, 2012). 그러나 천공기의 운용조건에 따라 달라지는 드릴비트 버튼의 타격 간격이 천공효율에 미치는 영향에 대해서 연구한 사례는 아직 조사된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 타격 속도 및 타격 간격에 따른 암석 파쇄량을 측정하고, 측정한 데이터로부터 비에너지를 산출하여 버튼의 최적 타격 간격 및 천공기의 최적 운용조건을 조사하였다.

2. 천공장비 및 시험방법

2.1 천공장비 개요

천공기는 천공 방법에 따라 Rotary drilling, DTH, THD

(Top hammer drilling) 방식으로 구분된다. 본 연구에서는 THD 방식을 사용하는 천공기를 기준으로 시험하였다. THD 방식을 사용하는 천공기의 붐(boom)은 일반적으로 드리프터, 익스텐션 로드(extension rod), 드릴 비트(drill bit)로 구성된다. 천공기의 드리프터는 유압에 의해 내부의 피스톤을 왕복 운동시키는 장치이며, 그 내부는 피스톤과 쉥크 어댑터(shank adapter) 등으로 구성된다. 피스톤은 전방의 쉥크 어댑터를 연속적으로 타격하고, 이로 인해 발생된 에너지는 쉥크 어댑터에 연결된 익스텐션 로드와 드릴 비트에 차례로 전달되어 암반 굴착에 필요한 에너지를 암반면에 전달하게 된다. 이렇게 전달된 타격 에너지로 인해 암반은 파쇄되고, 비트의 회전에 의해 분쇄되며, 에어 플러싱을 통하여 천공홀 밖으로 배출된다(송창현 등, 2012). 비트의 회전은 분쇄의 역할뿐만 아니라 비트헤드의 버튼을 새로운 타격 위치로 자리잡게 하는 역할도 한다(김광영 등, 2008). 또한 효율적인 암반 천공을 위해서는 암반에 비트가 확실히 밀착되어야 하며, 이 때 드릴 비트의 직경 및 버튼배열에 따라 피드압, 타격압, 타격수, 회전수 등이 적절하게 공급되어야 한다. Fig. 1은 드리프터에 의해 발생된 에너지가 전달되는 과정과 작동 원리를 도식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 1. Drilling mechanism of THD machine

2.2 드릴비트의 타격지점 분석

Fig. 2는 직경 102 mm 드릴비트의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 보이는 드릴 비트의 버튼들은 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 4개의 동심원(track)을 그리며 암반을 타격한다. 1번 버튼은 가장 안쪽에서 반경 12 mm의 원을 그리며 타격하게 되고, 2번과 3번 버튼은 반경 22 mm의 두 번째 원을 그리며 타격하게 되며, 4번, 5번, 6번 3개의 버튼은 반경 34 mm의 세 번째 원을 그리며 타격하게 된다. 마지막으로 7번부터 15번까지의 게이지 버튼은 반경 46 mm의 네 번째 원을 그리며 최외곽의 위치를 타격하게 된다.

암반 천공 시 Fig. 3에서 나타내고 있는 버튼의 타격 간격은 드리프터의 운용조건(타격수, 회전수)에 따라 달라진다. 버튼의 이전 타격 지점에서 다음 타격 지점까지의 간격이 너무 가깝게 되면 이미 파쇄된 부분을 재차 타격을 하게 되고, 이는 암반 천공을 위한 타격 횟수가 늘어나는 결과를 초래하여 상대적으로 많은 타격 에너지를 소비하게 된다. 또한, 버튼의 다음 타격 지점까지의 간격이 너무 멀게 되면 이전 타격 지점과 균열이 연결되지 않으므로 파쇄되지 않는 암반이 남아있게 되어 천공 작업이 비효율적으로 진행될 수 있다. 따라서 이전 타격 지점과 균열이 연결되면서 한번 타격에

Fig. 2. A head design of the drill bit ($\varnothing 102$ mm)

Fig. 3. Blow spacing of buttons

많은 부피를 천공하는 운용조건을 설정해야 효율적인 천공작업을 수행할 수 있다.

2.3 홉킨스바 시험 시스템

홉킨스바 시험 장치는 일반적으로 다양한 충격 하중에서 재료의 동적 물성을 규명하기 위한 실험적 방법으로 널리 쓰이고 있다. 이러한 홉킨스바 시험 장치는 충격 바의 발사장치, 입사바, 전달바, 완충바, 데이터 계측 시스템으로 구성된다(최미진 외, 2008, 양정훈 외, 2011). 본 연구에서는 드릴 비트의 버튼이 암석을 타격하는 현상을 모사하기 위하여 전북대의 홉킨스바 시험 장치를 일부 개조하여 활용하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 입사바 끝단에 직경 10 mm의 버튼이 장착된 봉을 체결하여 비트 표면의 버튼을 모사하였으며, 전달바와 완충바 대신 암석 거치대를 설치하여 단일 버튼의 타격에 의한 암석의 파쇄 과정을 조사하였다. 암석의 타격시 발생한 충격파가 암석 시편 끝단 경계면에서 인장파

Fig. 4. Hopkinson bar testing system

Fig. 5. Laser scanning system (LDI Ltd, 2012)

로 반사되는 것을 최대한 방지하기 위하여 타격면 이외의 모든 경계면을 구속하였다.

2.4 레이저 측정 시스템

홉킨스바 시험을 통한 타격 후 암석 파쇄량을 정량적으로 획득하고자 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 파쇄된 암석표면을 측정하였다. 본 측정 시스템은 laser beam을 측정 대상물에 조사시켜 대상물에 의해 산란된 빛을 CCD(Charge Coupled Device) array에 수집하고 3각 측량법을 사용하여 점(point)으로 대상물의 표면을 표현하는 방식이다(Fig. 5). 따라서 측정된 각 점은 X, Y, Z 좌표 값을 가지는 3차원 점 데이터로 출력된다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 단일 타격 시험에 의한 암석파쇄 규명

3.1.1 암석의 역학적 물성

홉킨스바 타격시험에 사용된 암석은 전라북도 익산시 황등면에서 생산되는 황등화강암이며, 시편 크기는 200×200×200 mm이고 기초 물성은 아래의 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보이는 바와 같이 압축강도(UCS)는 183 MPa로서 경암으로 분류되며, 압축강도와 인장강도의 비가 약 18이므로 파괴 시 취성거동 특성을 보일 것으로 예측된다.

3.1.2 공압과 타격속도 관계

홉킨스바를 이용한 암석 타격시험을 수행하기 전 충격봉 발사장치에 입력된 공압에 따른 충격봉의 타격속도 변화를 조사하였다. 충격봉의 타격 속도를 측정하기 위하여 홉킨스바 시험기에서 충격봉이 지나가는 경로

Table 1. Mechanical properties of rock sample

Rock type		Hwangdeung granite
Specific gravity		2.66
Porosity (%)		0.6
Wave velocity (m/s)	P wave	3,280
	S wave	2,000
Uniaxial compressive strength, UCS (MPa)		183
Brazilian tensile strength, BTS (MPa)		9.8
Young's modulus, E (GPa)		23
Poisson's ratio, ν		0.18

Fig. 6. Impact velocity with increase of gas pressure

에 2개의 광센서를 설치하였으며, 충격봉이 지나가는 순간 빛이 차단되는 전기적 신호를 오실로스코프를 이

용하여 측정하였다. 그 결과 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 공압이 증가함에 따라 충격봉의 타격속도가 완전한 2차 함수형태로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 데이터를 기준으로 공압을 이용하여 충격봉의 타격 속도를 제어하면서 타격시험을 수행하였다.

3.1.3 타격 속도에 따른 암석파쇄 현상 분석

단일 타격시험(single blow test)에서 타격속도에 따른 암석의 천공효율을 분석하기 위하여 충격봉의 타격속도를 증가시키며 암석시편을 타격하였고, 그 파쇄부피를 측정하였다. 측정한 데이터를 2차 함수로 회귀하여 Fig. 7에 도시하였다. 타격속도가 6 m/s에 도달할 때까지는 암석파쇄 부피가 0에 근접하여 암석시편이 거의 파쇄되지 않음을 알 수 있다. 타격속도가 7~12 m/s 구간에서는 타격속도에 따라 암석 파쇄량도 선형적으로 증가하며, 13 m/s를 정점으로 14 m/s부터는 파쇄량이 오히려 감소하는 양상을 보인다.

Fig. 7. Impact velocity vs. drilled volume

Fig. 8. SE variation with impact velocity.

Fig. 8은 타격속도에 따른 비에너지 변화를 보여주고 있다. 비에너지는 타격에너지를 암석파쇄부피로 나눈 수치로서 다음 식 (1)에 의해 계산할 수 있다. 비에너지 값이 상대적으로 높을수록 단위 부피를 천공하는 데에 드는 에너지량이 많아지므로, 비에너지 값이 낮을수록 높은 천공효율을 가지게 된다.

$$SE(J/mm^3) = \frac{\text{Impact energy}(J)}{\text{Drilled volume}(mm^3)} \quad (1)$$

Fig. 8에서 보이는 바와 같이 단일 타격시 타격속도가 약 10~12 m/s의 범위일 때 최상의 천공 효율을 가짐을 알 수 있었고, 타격속도가 14 m/s를 초과했을 때는 오히려 천공효율이 낮아지는 것으로 조사되었다. 이 결과는 타격 속도가 14 m/s로 증가할 때 암석의 파쇄부피가 오히려 감소하는 결과가 도출되었기 때문이다(Fig. 7). 이 결과는 홉킨스바 타격시험 시스템의 타격바와 제작 버튼의 압축파 전달과정의 특성 때문인 것으로 판단되며, 정확한 이유에 대해서는 추가 실험 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.2 다중 타격시험에 의한 천공성능 예측

3.2.1 타격 거리에 따른 다중 타격시험

천공기 운용조건에 따른 천공효율을 예측하기 위하여 버튼의 타격거리를 변화시키며 홉킨스바 타격시험을 수행하였다. 단일 타격 시험에서 파쇄된 암석이 다음 타격시험에 영향을 미치지 않을 정도의 간격을 도출하였고, 그 간격을 기준으로 속도 및 타격간격 별 시험을 수행하였다. 암석시편의 표면을 1차 타격한 후 설정된 거리만큼 시편을 이동시키고, 2차, 3차 타격을 계속 가하는 방식으로 시험을 진행하였다. 충격봉의 타격속도는 각각 8, 10, 12 m/s로 설정하고, 버튼의 타격거리는 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25, 30 mm로 설정하였다. 설정한 타격속도와 타격거리를 조합하여 3~10회 타격 시험을 진행하였다. 타격시험 후 암석시편의 표면 전체를 레이저 스캐너로 측정하여 파쇄된 암석부피를 측정하였다. 시험조건과 결과를 Table 2에 정리하였으며, 여기서 drilled volume은 암석의 파쇄부피, impact energy는 타격에너지, SE는 비에너지이다.

3.2.2 천공성능 예측결과

Fig. 9는 충격봉의 타격속도가 8 m/s일 때 파쇄된 암석표면의 형상을 보여주고 있다. 좌측부터 우측까지 타격간격이 3~30 mm인 조건이며, 타격간격이 20 mm 이상부터는 타격지점 간 균열이 원활히 연결되지 않는

Table 2. Hopkinson bar test results

Velocity (m/s)	Spacing (S, mm)	No. of impact	Drilled volume (mm ³)	Impact energy (J)	Specific energy (SE, J/mm ³)
8	3	5	521.2	357.5	0.69
	6	5	520.6	357.5	0.69
	9	5	612.6	357.5	0.58
	12	5	1099.4	357.5	0.33
	15	5	1001.0	357.5	0.36
	20	5	868.6	357.5	0.41
	25	4	633.4	286.0	0.45
	30	4	226.3	286.0	1.26
10	3	5	1011.6	558.6	0.55
	6	8	1597.8	893.8	0.56
	9	10	2598.2	111.7	0.43
	12	7	1888.5	78.2	0.41
	15	6	1623.2	67.0	0.41
	20	5	1781.3	55.9	0.31
	25	4	1850.1	446.9	0.24
	30	3	1164.5	335.2	0.29
12	3	7	1866.9	782.0	0.42
	6	7	2491.9	782.0	0.31
	9	7	2658.2	782.0	0.29
	12	7	2726.5	782.0	0.29
	15	7	2827.8	782.0	0.28
	20	5	3512.3	558.6	0.16
	25	5	4615.0	558.6	0.12

Fig. 9. 3D surfaces of rock sample with blow spacing (at 8 m/s blow speed)

것을 확인할 수 있다. 정량적인 분석을 위해 타격거리 별 비에너지 변화를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 충격봉의 타격속도가 8 m/s인 경우에는 타격

간격이 12 mm일 때 최적의 천공효율을 보이는 것으로 조사되었으며, 이는 8 m/s의 타격속도에서는 드릴비트 버튼의 타격간격이 12 mm 정도를 유지하도록 해야 천

공작업이 효율적으로 이루어진다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 충격봉의 타격속도가 10 m/s일 때 파쇄된 암석표면의 형상을 보여주고 있다. 좌측부터 우측까지

타격간격이 3~30 mm인 조건이며, 30 mm를 초과하는 타격간격부터 타격지점 간 균열이 연결되지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12에서 보이는 바와 같이 타격속

Fig. 10. SE vs. impact spacing (8 m/s)

Fig. 12. SE vs. impact spacing (10 m/s)

Fig. 11. 3D surfaces of rock sample with blow spacing (at 10 m/s blow speed)

Fig. 13. 3D surfaces of rock sample with blow spacing (at 12 m/s blow speed)

도가 10 m/s일 때 최적 타격간격은 25 mm로 도출되었으며, 타격간격이 30 mm를 초과하는 조건에서는 천공 효율이 감소할 것으로 예측된다.

Fig. 13은 충격봉의 타격속도가 12 m/s일 때 파쇄된 암석표면의 형상을 보여주고 있다. 타격간격이 증가함에 따라 균열이 연결되지 않는 지점을 조사하고자 하였으나 시험 전 예측한 타격영역을 초과하여 25 mm 간격의 타

격시험 시 인접한 타격시험 트랙(S: 20mm)까지 균열이 연결되는 현상이 나타났다. 두 지점의 간격이 약 30 mm 임을 감안하면 타격 간격이 30mm인 조건에서도 균열이 원활히 연결될 것으로 예측된다. 따라서 12 m/s의 속도로 타격시험 시에는 타격시험에 영향을 미치지 않을 정도의 간격을 두고 추가시험이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 암반파쇄 수치해석

3.3.1 수치모델 구성

단일 타격에 대한 수치해석을 위하여 2차원 x축을 기준으로 한 축대칭 모델을 Fig. 15와 같이 생성하였다. 버튼은 4분원으로 생성하여 초기속도를 입력하였고, 암석의 가장자리에는 변위구속 및 응력과 투과 조건을 부여하였다. 버튼의 규격은 직경 10 mm의 반구형으로 홉킨스바 타격버튼과 동일한 치수이며 버튼의 재료모델은 ANSYS Material Library(Century Dynamics, 2003)의 텅스텐 합금으로 입력하였다. 암석시편은 반경 50 mm의 실린더형이며 외곽면에는 변위구속 조건 및 응력과 투과조건을 부여하였다. 암반의 재료모델은 Drucker-Prager 항복함수(Cho 외, 2010, 정호영 외, 2012)를 도입하여 황등화강암의 재료 특성을 구현하였다.

Fig. 14. SE vs. impact spacing (12 m/s)

Fig. 15. 2D numerical models of button and rock

3.3.2 수치해석 결과

홉킨스바 타격시험을 AUTODYN으로 해석한 결과를 Fig. 16에 도시하였다. 좌측 그림은 축대칭 모델의 3차원 형상이며, 우측은 암석파쇄 부분을 확대한 그림

이다. 본 해석결과를 바탕으로 타격속도에 따른 수직방향의 균열길이와 수평방향으로의 균열길이를 Table 3에 나타내었다. 그 결과, 수직 균열길이는 타격속도 증가에 따라 증가폭이 크지 않았으나 수평방향 균열길이

(a) at 8 m/s

(b) at 10 m/s

(c) at 12 m/s

Fig. 16. Numerical result at different impact velocity conditions

Table 3. Crack lengths with impact velocity

Impact velocity (m/s)	Vertical crack (mm)	Horizontal crack (mm)	Horizontal/vertical crack
8	4.5	8.0	1.78
10	5.5	9.0	1.64
12	5.0	11.0	2.2

Table 4. Predicted specific energy (SE_p) with increase of blow spacing of gage buttons (S_{gage})

SE_p (J/mm ³)	S _{gage}				
Button No.	12 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
Button #1	0.69	0.69	0.55	0.69	0.60
Button #2	0.69	0.68	0.53	0.33	0.36
Button #3	0.69	0.68	0.53	0.33	0.36
Button #4	0.58	0.37	0.36	0.42	0.37
Button #5	0.58	0.37	0.36	0.42	0.37
Button #6	0.58	0.37	0.36	0.42	0.37
Button #7	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #8	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #9	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #10	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #11	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #12	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #13	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #14	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Button #15	0.33	0.36	0.41	0.45	1.26
Mean	0.452	0.427	0.425	0.444	0.918

는 타격속도의 증가에 따라 지속적으로 증가하는 양상을 보였다. 본 수치해석 결과에서도 타격 속도의 상승이 수평방향 균열의 확산에 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서 타격압 및 타격 속도에 따라 최적의 RPM을 유지하는 것이 천공작업의 효율성과 가장 밀접한 관계가 있는 것으로 확인되었다.

3.4 결과 및 토의

Atlas Copco(2006)에 따르면 드릴비트의 회전은 최외각 버튼(gage button)이 10 mm 정도 간격으로 타격이 되도록 하는 것이 적절하다고 보고된 바 있다. 본 연구의 타격시험 결과(Fig. 9, 10)와 비교했을 때 국내현장에 사용되는 THD 천공기의 드리프트는 본 홉킨스바 시험의 8 m/s에 해당하는 타격에너지를 배출하는 것으로 추측된다.

드릴비트가 회전할 때 각각의 버튼은 버튼의 위치에 따라 회전하는 반경이 다르므로 이동거리 또한 상이하고, 따라서 비에너지 역시 다르다. Fig. 2와 같은 직경 102 mm 드릴비트가 암반을 1회 타격할 경우에 발생하

는 각 버튼의 비에너지 추정치(SE_p)를 도출하였다. 각 버튼의 비에너지 추정치는 Table 2의 8 m/s의 타격간격 별 비에너지 데이터를 활용하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 각 버튼의 비에너지 추정치를 활용하여 전체 버튼의 비에너지 평균값도출하였고, 도출한 평균값을 1회 타격시 드릴비트 전체의 천공성능으로 예측하였다(Fig. 17). 최외곽 버튼의 타격간격이 12~25 mm 까지는 평균 비에너지가 0.42~0.45 J/mm³으로 비슷하지만, 타격간격이 25 mm 이상에서는 0.9 J/mm³ 이상으로 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 본 결과에서는 최외각 게이지 버튼의 타격간격이 12 mm에서 25 mm로 증가할 때까지 천공성능이 최적치로 유지되는 것으로 예측되었다. 이 예측치는 Atlas Copco(2006)와 상이한 결과이다.

결과적으로 본 예측결과(Fig. 17)는 단일 버튼을 이용한 타격시험 결과를 바탕으로 추정한 것이므로 실제 드릴비트 전체의 천공성능을 정확히 예측하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 실제 천공작업에서는 초기 천공시점을 제외하고는 선행 타격에 의해 손상을 받은

Fig. 17. Blow spacing (S_{gauge}) of gauge buttons vs. Mean SE (at 8 m/s)

암반을 지속적으로 타격하는 과정으로 천공 작업이 진행된다. 이 때 타격압에 따른 천공효율과 최적 운용조건은 암반의 손상조건에 따라 달라질 것으로 판단된다. 그러나 현재의 시험 데이터는 손상이 없는 깨끗한 암석면에 타격을 한 것이므로, 실제 천공 과정과 유사한 환경을 제공하기 위해서 선행타격으로 인해 손상된 암반에 대한 타격시험을 수행할 필요가 있다.

그리고 드릴비트의 버튼 배열을 살펴보면 가장 중앙에 위치한 버튼부터 최외곽에 위치한 게이지 버튼들까지 각각 4개의 동심원 트랙(track)을 그리며 타격하게 된다. 그러나 본 연구의 타격시험에서는 트랙 사이의 상호작용을 분석하지 못한 한계가 있으므로 이에 대한 추가적인 연구도 필요하다.

또한 본 연구에서 수행한 수치해석에서는 단일 타격 시험만을 모사하기 위하여 암반과 버튼을 2차원으로 모델링하였다. 이후 3차원 모델링 및 다중 타격 해석으로 발전시킨다면 천공시 암반 파쇄 메커니즘을 명확히 이해하는 데에 유용하게 활용될 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 암석 천공효율 조사를 위한 기초 데이터베이스 구축을 위해 홉킨스바 시험기를 이용한 단일 타격 및 다중 타격시험을 수행하였고, 수치해석을 통해 단일 버튼의 타격에 의한 암석의 파쇄과정을 모사하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

암석에 대한 타격시험 결과, 타격압이 증가함에 따라 최적 타격 간격도 증가함을 알 수 있었다. 본 연구에서 도출된 최적 타격간격은 충격봉의 타격속도가 8 m/s일 때 12 mm, 10 m/s일 때 25 mm이다. 타격간격이 최적 간격으로 유지될 때 최상의 천공효율을 가지는 것을 확

인하였다. 따라서 드리프트와 드릴비트의 사양 및 암반 조건에 따라 최적 운용조건을 제시한다면 천공기의 작업능력을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 암중에 따른 타격에너지 및 타격간격 데이터를 축적한다면 천공시스템을 선진화하고 암종별 최적 운용조건을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

단일 타격시험 결과를 바탕으로 드릴 비트 전체의 천공성능을 예측한 결과, 게이지 버튼의 타격간격이 12 mm에서 25 mm로 증가할 때까지 천공성능이 최적치로 유지되어 기존 문헌(Atlas Copco, 2006)과 상이한 예측 결과가 도출되었다. 이는 본 연구의 단일 타격시험의 시험조건 한계점 때문인 것으로 판단되며 정확한 예측을 위해 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

타격을 수치해석으로 모사한 결과, 타격속도 증가에 따라 수평방향 균열의 길이가 증가하는 양상을 확인할 수 있었다. 수치해석 방법은 암석 타격시험 결과와 유사한 경향을 보이므로 천공시 암석 파쇄 경향을 구현할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 다중 타격을 모사한다면 일부 실험결과를 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 선행 천공에 의한 암석의 손상 영향을 규명하고, 버튼 트랙 사이의 상호작용을 고려한 타격시험이 수행된다면 최적 천공 조건을 더욱 정확히 조사할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 지식경제부 기술혁신사업(10036999, 굴착용 천공 드릴 모듈) 및 한국생산기술연구원 역량강화사업의 지원을 받은 연구결과입니다. 실험에 도움주신 전북대학교 강형민, 정상선 연구원과 레이저디자인시스템(주)에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Atlas Copco, 2006, Surface Drilling in Quarry and Construction.
2. Bu, C., Qu, Y., Cheng, Z., Liu, B., 2009, Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling, Journal of Earth Science, 20.5, 868-878.
3. Century Dynamics Inc., 2003, AUTODYN Theory Manual, Concord, California, USA.
4. Cho, J.-W., Jeon, S., Yu, S.-H., and Chang, S.-H., 2010, Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, No. 3, 230-244.
5. Choi, M. J., Cho, S. H., Yang, H. S., 2008, A Study on dynamic Fracturing Behavior of Anisotropic Granite by SHPB Test, Tunnel & Underground Space, Vol. 18,

- No. 3, 241-218.
6. Hustruid, W.A. and Fairhurst, C., 1971(a), A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, Part I - Theory of percussive drilling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 8, 311-333.
 7. Hustruid, W.A. and Fairhurst, C., 1971(b), A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, PART II - Force-penetration and specific energy determinations, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 8, 335-356.
 8. Hustruid, W.A. and Fairhurst, C., 1972(a), A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, PART III - Experimental verification of the mathematical theory, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, 417-429.
 9. Hustruid, W.A. and Fairhurst, C., 1972(b) A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, PART IV - Application of the model to actual percussion drilling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, 431-449.
 10. Jeong, H. Y., Jeon, S. W., Cho, J. W., 2012, A Study on Punch Penetration Test for Performance Estimation of Tunnel Boring Machine, Tunnel & Underground Space, Vol. 22, No. 2, 144-156.
 11. Kim, K. Y., Kim, C. Y., Kim, K.-S., 2008, Assessment of Hydraulic Drilling Data on Homogeneous Rock Mass, Tunnel & Underground Space, Vol. 18, No. 6, 480-490
 12. LDI Ltd, 2012, 3D Laser Scanner catalog: RPS LASER PROBES (on website).
 13. Oh, J. Y., Lee, G. H., Song, C. S., 2011, A Study on the Analysis of Hydraulic Circuit of a Rockdrill Drifter, The Korea Fluid Power System Society, Proceeding of the KFPS 2011 Spring Conference, 70-75.
 14. Shin, D. Y., Song, C. H., 2012, Performance Optimization of Down-the-Hole Hammer Using Taguchi Method, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, Vol. 36, No. 1, 109-116.
 15. Song, C. H., Kwon, K. B., Park, J. Y., Shin, D. Y., Cho, J. W., 2012, Optimization of Flow Path of Drill Bit Using CFD Simulation, Tunnel & Underground Space, Vol. 22, No. 4, 257-265.
 16. Yang, J. H., Ahn, J. L., Kim, S. K., Song, Y. S., Sung, N. H., Lee, Y. K., Cho, S. H., 2011, Estimation of Dynamic Brazilian Tensile Strengths of Rocks Using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) System, Tunnel & Underground Space, Vol. 21, No.2, 109-116

권 기 범

2009년 한국산업기술대학교 기계설계공학부 학사
2011년 한국산업기술대학교 기계시스템설계공학부 석사

Tel: 053-607-1125
E-mail: kbkwon@kitech.re.kr
현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 연구원

송 창 헌

2009년 한국산업기술대학교 기계설계공학부 학사
2011년 한국산업기술대학교 기계시스템설계공학부 석사

Tel: 053-607-1124
E-mail: sch8310@kitech.re.kr
현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 연구원

박 진 영

2006년 경북대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 학사
2009년 경북대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 석사

Tel: 053-607-1122
E-mail: jinyoungpark@kitech.re.kr
현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 연구원

신 대 영

1989년 한양대학교 정밀기계공학과 학사
1989년 한양대학교 정밀기계공학과 석사
2000년 한양대학교 정밀기계공학과 박사

Tel: 053-607-1100
E-mail: dyshin@gmail.com
현재 한국생산기술연구원, 대경본부 연구부문장/ 수석연구원

조 정 우

2002년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 학사
2010년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 053-607-1102
E-mail: chojw1665@gmail.com
현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 선임연구원

조 상 호

1998년 전북대학교 공과대학 자원공학과 학사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과 석사
2003년 북해대학교 대학원 공학연구과 박사

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@chonbuk.ac.kr
현재 전북대학교 자원·에너지공학과 교수