

천공 효율 향상을 위한 드릴비트 버튼배열 성능평가 방법

강 훈* · 조정우** · 정명식* · 조용재* · 이상곤* · 이재욱**

* 한국생산기술연구원 극한제조기술연구실용화그룹, ** 한국생산기술연구원 융복합기술연구실용화그룹

Evaluation of a Drill Bit Button Arrangement for Enhanced Drilling Efficiency

Hoon Kang*, Jung Woo Cho**, Myeong Sik Jeong*, Yong Jae Cho*, Sang Kon Lee*
and Jae Wook Lee**

* Ultimate Manufacturing Technology R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology

** Technology Convergence R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology

(Received January 11, 2015 ; Revised April 14, 2015 ; Accepted April 21, 2015)

Key Words: Button Arrangement Method(버튼 배열법), Drill Bit(드릴 비트), Drilling Efficiency(천공 효율), Rock Drilling & Fragment(암반천공 및 파쇄), Drilling Deviation(천공편향)

초록: 드릴비트는 암반에 직접적으로 타격력과 회전력을 전달함으로써 연속적으로 암반을 파쇄, 분쇄하는 천공기의 핵심 구성요소이다. 일정한 속도로 회전하는 동시에 회전축 방향으로 타격하며 암반을 파쇄하기 때문에 암반 파쇄효율을 높이기 위해서는 드릴비트의 배열 최적설계가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 버튼배열 최적화를 수행하기 위한 선행연구로서 버튼배열의 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 버튼의 중복타격 면적, 비 타격 면적, 천공편향 모멘트와 같은 평가지표를 활용하여 버튼배열의 파쇄 효율성을 평가하였으며, 더불어 제안된 평가방법을 활용하여 기존 드릴비트 버튼배열의 파쇄 효율성을 검토함으로써 제안한 배열성능 평가방법의 적합성을 확인하였다.

Abstract: The drill bit, which directly transmits percussive forces and torque to the rock, is the core part of a rock drilling machine. For effective drilling, the button arrangement of a drill bit should be optimized because it is the most important design factor in determining drilling efficiency. Furthermore, a quantitative method is necessary to evaluate the button arrangement for the optimization of the drill bit button. Therefore, we propose a new method for the evaluation of the drill bit button arrangement using new evaluation indices, which include the overlapped impact area, blank area, and moment. Moreover, we verify the suitability of the proposed evaluation method by applying it to the conventional button arrangement.

- 기호설명 -

r_i : i 번째 버튼이 설치된 반경(mm)
 θ_i : i 번째 버튼이 설치된 각도(rad)
 $\delta\theta_k$: k 번째 타격 시 버튼의 회전각도(rad)
 ω : 드릴비트의 회전각속도(rad/s)
 (x_{ik}, y_{ik}) : i 번째 버튼의 k 번째 타격점 좌표

RPM, BPM: 드릴비트 분당 회전수 및 타격수
 T_b : 드릴비트의 타격 주기(s)
 d_s : 타격점 간의 간격(mm)
 d_p : 타격면적의 지름(mm)
 A_s : 드릴비트 1회전 시 중복타격 면적(mm²)
 A_B : 근사법으로 계산한 비 타격 면적(mm²)
 N_p : 비 타격 면적의 픽셀 수
 p_n : 해상도(pixels/mm)
 A_T : 실제 비 타격 면적(mm²)
 M_x, M_y : x, y축 천공편향 모멘트(N·mm)

† Corresponding Author, jaewk@kitech.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

Fig. 1과 같이, 천공기⁽¹⁾는 토목공사, 터널공사, 광산 등의 공사 현장에서 암반에 구멍을 뚫는 건설 장비이며, 드릴비트는 암반에 접촉하여 직접적으로 암반에 타격력과 회전력을 전달하는 천공기의 핵심 구성요소이다. 드릴비트의 암반파쇄 매커니즘은 일정한 속도로 회전하는 동시에 회전축 방향으로 타격하며 접촉되는 암반을 연속적으로 파쇄, 분쇄하는 것이므로 이러한 암반 파쇄 효율을 높이기 위한 드릴비트 설계가 매우 중요하다. 드릴비트의 파쇄 성능, 즉 천공효율과 천공 작업속도를 결정하는 인자로는 버튼의 배열, 비트헤드 디자인, 내부 유로설계 등이 있으나 이 중 버튼배열은 천공효율을 결정하는 가장 중요한 설계변수⁽²⁾로 알려져 있다. 따라서 천공 효율을 높이기 위해서는 버튼의 배열이 파쇄 효율을 높이는 방향으로 최적설계되어야 하므로, 본 연구에서는 최적설계를 수행하기 위한 선행 연구로써 버튼배열의 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 버튼의 중복타격 면적, 비 타격 면적 그리고 드릴비트 천공편향 모멘트와 같은 평가지표를 활용하여 버튼배열의 파쇄 효율성을 정량적으로 평가하는 방법을 제안하였으며, 더불어 제안된 평가방법을 활용하여 기존 드릴비트 버튼배열의 파쇄 효율성을 검토함으로써 제안한 배열성능 평가방법의 적합성을 확인하였다.



Fig. 1 Rock drilling machine(left) & Drill bit(right) of EVERDIGM⁽¹⁾

2. 버튼의 타격점 계산

2.1 드릴비트의 구조

본 연구에서 대상으로 하는 드릴비트는 탑 해머 드릴링(Top Hammer Drilling) 방식의 천공기에 사용되는 $\phi 102\text{mm}$ 드릴비트이며, Fig. 2과 같이 텅스텐 카바이드 재질의 버튼과 플러싱 채널로 구성되어 있다. 전방에 위치하는 텅스텐 카바이드 재질의 버튼은 천공기의 타격력과 회전력을 직접 암반에 전달하여 암반을 분쇄하는 역할을 하고, 플러싱 채널은 압축공기를 불어넣어 분쇄된 암반조각을 천공 홀 밖으로 배출하는 역할⁽²⁾을 한다. 드릴비트의 암반파쇄 매커니즘은 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 일정한 타격간격(blow spacing)을 둔 버튼이 회전하며 암반을 연속 타격하고, 이러한 타격 과정을 통해 암반 표면의 균열이 서로 연결되어 암석파편이 생성된다.^(2,3) 비록 게이지 버튼도 암반을 정면으로 타격하면서 천공 홀 벽면을 분쇄하는 역할을 수행하지만 가이드 역할이 더 크므로⁽²⁾ 본 논문에서는 평가 대상으로 고려하지 않았고 단지 정면에 부착된 버튼배열 평가만을 연구하였다.

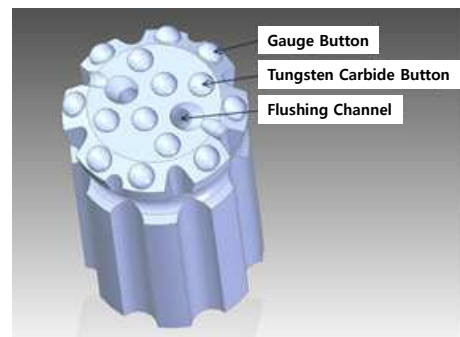


Fig. 2 Configuration of a drill bit head

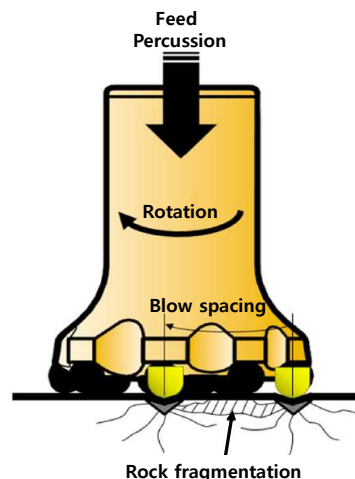


Fig. 3 Rock fragmentation mechanism of a drill bit⁽²⁾

2.2 타격점 계산

드릴비트의 버튼이 암반을 타격하는 타격점을 계산하기 위하여 정면의 6개의 버튼($i=1\sim6$)에 대해 Fig. 4과 같이 좌표계를 설정하였다. 좌표계의 중심(C)은 드릴비트의 회전중심에 위치하며, 6개의 버튼이 설치된 위치는 반경(r_i)과 각도(θ_i)를 사용하여 표현하였다. 버튼의 타격점은 드릴비트가 회전하면서 버튼의 중심점이 타격하는 지점이므로 식 (1)로부터 버튼의 초기 위치($r_i \cdot \cos(\theta_i)$, $r_i \cdot \sin(\theta_i)$)를 기준으로 한 i 번째 버튼의 k 번째 타격점 좌표(x_{ik}, y_{ik})을 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{ik} \\ y_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta\theta_k) & -\sin(\delta\theta_k) & 0 \\ \sin(\delta\theta_k) & \cos(\delta\theta_k) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \cdot \cos(\theta_i) \\ r_i \cdot \sin(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, k 번째 타격 시 버튼의 회전각도($\delta\theta_k$)는 드릴비트의 회전각속도(ω)와 타격주기(T_b)를 사용하여 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며, 회전각속도와 타격주기는 각각 천공기를 운용하는 RPM과 BPM으로부터 식 (3)과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$\delta\theta_k = \omega \cdot T_b \cdot k \quad (2)$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot RPM}{60}, T_b = \frac{60}{BPM} \quad (3)$$

이러한 방법으로 계산한 드릴비트 버튼의 타격점을 Fig. 5와 같이 표현하여 직관적으로 타격점 간의 간격을 확인하여 버튼배열을 평가할 수도 있지만, 본 연구에서는 타격점 좌표를 평가지표에 적용하여 보다 정량적이고 객관적으로 버튼배열을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.

3. 버튼배열 평가지표

3.1 중복 타격 면적

본 연구에서는 드릴비트 버튼배열의 파쇄효율성을 평가하기 위한 지표로 중복타격 면적을 제안하고자 한다. 중복타격은 타격점 간의 간격이 가까울 때 발생하게 되며, 이미 타격된 부분을 재차 타격하기 때문에 암반 천공을 위한 타격횟수가 증가하는 결과를 초래하여 천공작업에 있어서 상대적으로 많은 타격에너지를 소비시킨다.⁽³⁾ 따라서 본 연구에서는 중복타격 면적(overlapped impact area)을 계산하여 버튼배열의 중복타격 정

도를 정량적으로 표현할 수 있는 방법에 관하여 연구하였다. 중복타격은 Fig. 6에 표현된 것과 같이 타격점 간의 간격(d_s)을 타격점 좌표로부터 계산하여, 간격이 버튼 타격면적의 지름(d_p)보다 작은 경우 중복타격이 발생한 것으로 판단한다.

중요한 사항은 버튼 타격면적의 지름은 버튼의 크기와 암반의 종류에 따라 다르며 실험적으로 구해야 한다는 점이다. 드릴비트가 1회전 시 발

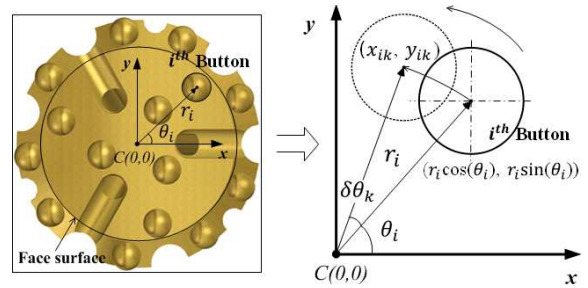


Fig. 4 Coordinate system of a drill bit button

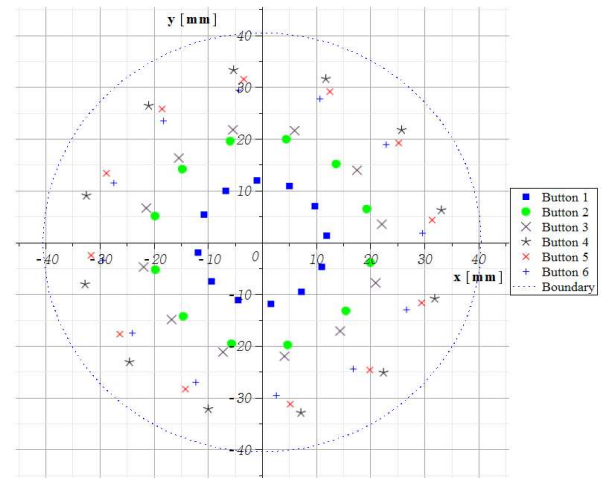


Fig. 5 Impact points of 6 drill bit buttons during 1 revolution

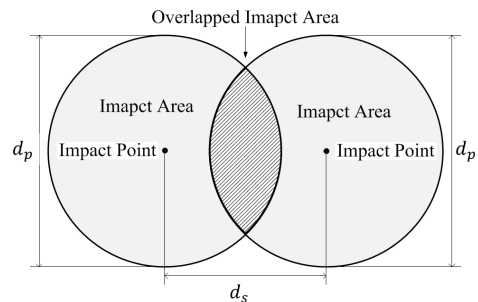


Fig. 6 Description of an overlapped impact area

생하는 모든 타격점에 대해 중복타격 여부를 검사하고, 중복타격이 발생한 경우 Fig. 6과 식 (4)를 사용하여 중복타격 면적을 계산한다. 계산된 중복타격 면적의 총합이 해당 버튼배열에 대한 중복타격 면적이 되며, 이를 통해 버튼배열이 효과적으로 이루어졌는지 평가할 수 있다.

$$A_s = 2 \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 \cos^{-1} \left(\frac{d_s}{d_p} \right) - d_p \sqrt{\left(\frac{d_p}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_s}{2} \right)^2} \quad (4)$$

3.2 비 타격 면적

중복타격 면적이 작더라도 버튼이 천공 영역을 고르게 타격하지 않는 경우가 발생하므로, 중복타격 면적만을 사용하여 버튼배열을 평가하기엔 부족하다. 따라서 본 연구에서는 버튼이 천공 영역을 고르게 타격하는지 알아보기 위한 지표로 비 타격 면적(blank area)을 사용하였다.

비 타격 면적은 천공 대상 면적에서 드릴비트가 1회전하는 동안 타격하는 전체 면적(union area)을 뺀 부분으로서, 버튼이 타격하지 않은 면적을 의미한다. 즉, 비 타격 면적이 작을수록 버튼이 효과적으로 천공작업을 수행했음을 의미한다. 이러한 비 타격 면적을 계산하기 위해서는 버튼이 타격하는 전체 면적을 계산해야 하지만 동일영역에 중복타격이 3회 이상 이루어진 경우에는 계산이 매우 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 타격 면적이 포함된 이미지를 사용한 근사법(approximation method)을 이용하여 비 타격 면적을 계산하는 방법을 제안하였다.

비 타격 면적을 계산하는 방법은 Fig. 7과 같이

버튼 타격점을 이용하여 타격 면적을 나타내고, 타격 면적과 비 타격 면적에 서로 다른 컬러 값(24-bit RGB)을 부여하여 디지털 이미지를 생성한다. 이후에 디지털 이미지에서 각각의 픽셀(pixel)에 부여된 컬러 값을 추출하여 픽셀컬러 배열을 만들고, 이러한 배열로부터 비 타격 면적과 동일한 컬러를 가지는 픽셀 수(N_p)를 카운트하여 단위 픽셀의 면적을 곱해줌으로써 비 타격 면적을 계산한다.⁽⁵⁾ 단위 픽셀의 크기는 디지털 이미지의 해상도(p_n)로부터 계산할 수 있으며, 식 (5)로 비 타격 면적(A_B)을 계산할 수 있다.

$$A_B = N_p \times \left(\frac{1}{p_n} \right)^2 \quad (5)$$

이러한 근사법은 전체 이미지를 지정한 해상도로 분할하여 면적을 계산하는 방법이기 때문에 이미지의 해상도를 높일수록 더 정확한 근사 면적을 얻을 수 있다. 하지만 해상도를 높일수록 픽셀 수를 카운트하는 시간 또한 증가하기 때문에 적절한 수준의 정확도를 갖는 해상도를 찾아 적용해야 하므로 본 연구에서는 적정 해상도를 찾기 위하여 5개의 드릴비트 모델에 대해 근사법을 사용한 비 타격면적과 실제 비 타격 면적(A_T , CAD 프로그램 사용)을 계산하여 상대 오차(relative error)를 비교하였다. 상대오차는 식 (6)을 사용하여 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

$$\text{RelativeError} [\%] = \frac{|A_B - A_T|}{A_T} \times 100 \quad (6)$$

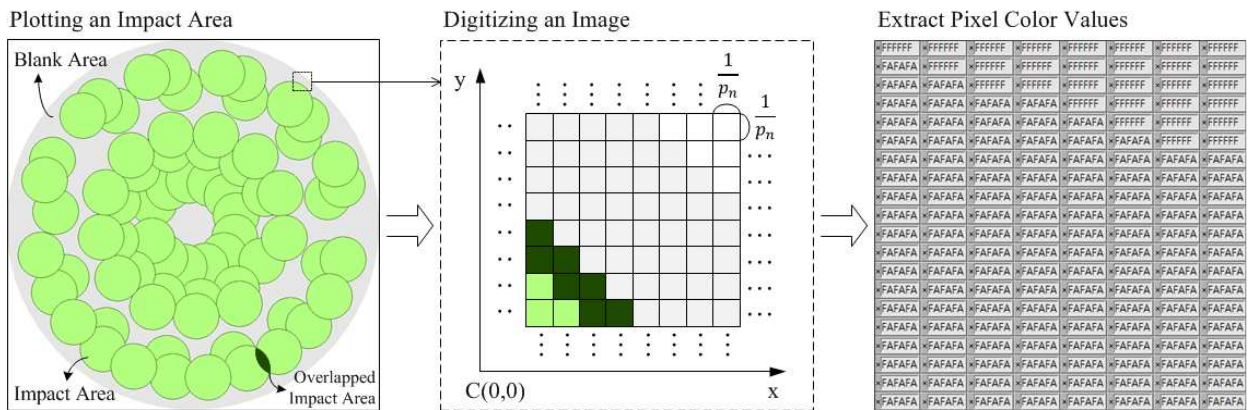
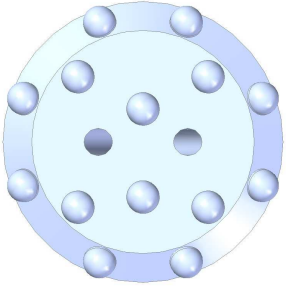
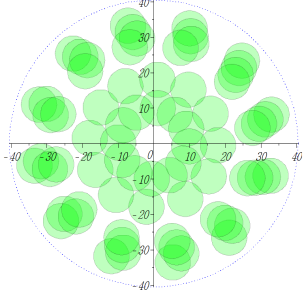
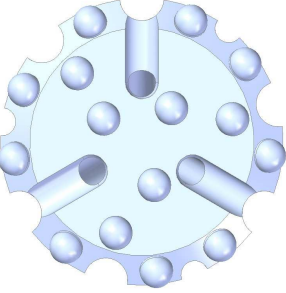
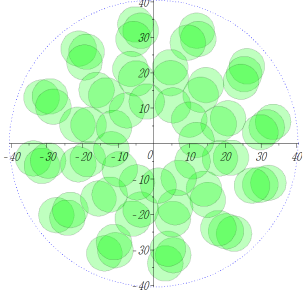
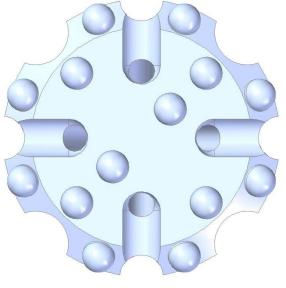
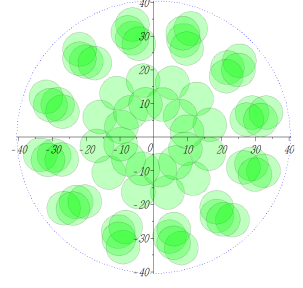


Fig. 7 Approximation method for calculating a blank image

Table 1 Evaluation of the button arrangement with the new evaluation indices (at 180RPM, 2200BPM)

Model	Button Arrangement	Impact Area Distribution	Evaluation Index	
1			Overlapped Area [mm ²]	3643.77
			Blank Area [mm ²]	1945.67
			Mx [N·mm]	13.66
			My [N·mm]	0
2			Overlapped Area [mm ²]	2752.46
			Blank Area [mm ²]	1828.25
			Mx [N·mm]	12.66
			My [N·mm]	2.03
3			Overlapped Area [mm ²]	3621.11
			Blank Area [mm ²]	2026.08
			Mx [N·mm]	7.78
			My [N·mm]	4.95

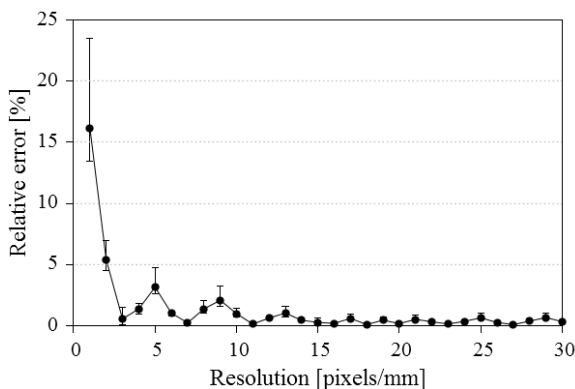


Fig. 8 Relative error according to a resolution

Fig. 8에서 알 수 있듯이 해상도가 증가함에 따라 상대 오차는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 14[pixels/mm] 이상의 해상도에서 상대 오차가 1% 미만인 되므로, 비 타격 면적을 계산하는데 있어서 20[pixels/mm]의 해상도를 사용하

면 적절하다고 판단할 수 있다.

3.3 천공편향 모멘트

만약, 드릴비트의 버튼이 고루 배열되어 있지 않으면 천공작업 시 타격력이 암반에 고루 전달되지 못하고, 이로 인해 천공기의 기계부품 수명을 단축시킨다. 따라서 본 연구에서는 이러한 드릴비트의 천공편향(drilling deviation)을 평가하기 위한 지표로 천공편향 모멘트(moment)를 제안하였다. 천공편향 모멘트는 단위 힘(1N)에 대해 드릴비트에 설치된 버튼이 x축과 y축에 대하여 가지는 모멘트로 정의할 수 있다. 여기서, x, y축에 대한 모멘트를 계산한 이유는 드릴비트가 평면 암반을 타격할 때 각각의 축에 대한 독립적인 모멘트를 받기 때문이다. 6개 버튼에 대한 x축 모멘트(M_x)와 y축 모멘트(M_y)는 식 (7)로부터 계산할 수 있다.

$$M_x = \sum_{i=1}^6 |1 \times r_i \cdot \sin(\theta_i)|$$

$$M_y = \sum_{i=1}^6 |1 \times r_i \cdot \cos(\theta_i)|$$
(7)

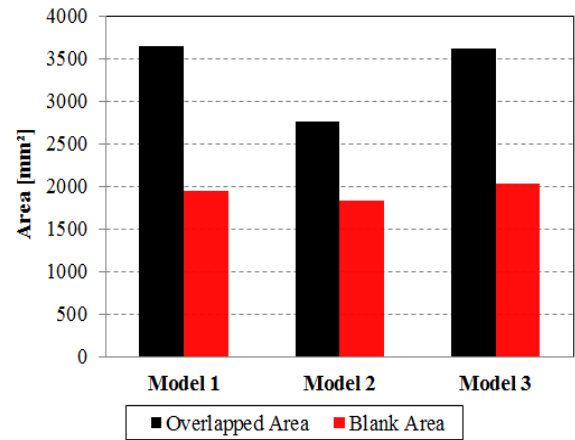
4. 버튼배열 평가

제안한 버튼배열 평가방법의 적합성(suitability)을 검토하기 위하여 본 절에서는 앞서 제안된 평가방법을 기준에 사용되는 세 종류의 드릴비트 버튼에 적용하였다. 버튼배열 성능평가를 위한 설계인자로 일반적인 천공기 운용조건 중 하나인 180RPM, 2200BPM을 설정⁶⁾하였으며 버튼 타격 면적의 지름(d_p)은 연암 파쇄 기준인 10mm로 설정하였다.

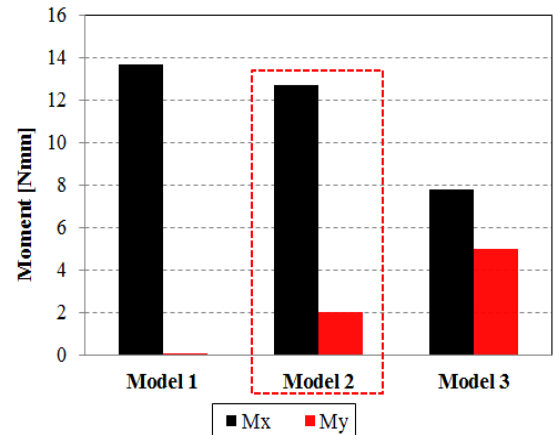
주요 형상과 사이즈는 모두 동일하나 버튼배열만 서로 다른 세 종류의 드릴비트 모델에 대해 제안한 버튼배열 평가방법을 적용한 결과를 Table 1과 Fig. 9에 나타내었다. 제안한 성능평가지수 즉, 중복타격 면적, 비 타격 면적 그리고 천공편향 모멘트를 활용하여 주어진 버튼배열의 파쇄 효율성을 평가하면 중복타격 면적과 비 타격 면적 측면에서 두 번째 모델의 버튼배열이 다른 모델보다 우수하다는 것을 알 수 있으며, 모멘트 측면에서는 세 종류의 모델 모두 각각의 축에 대하여 조금씩 편향되어 있으나 세 번째 모델이 가장 우수하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 암반의 종류, 천공기의 특성, 천공 효율이나 파쇄 작업 등에 따라 세 지표의 가중치를 적절히 결정한다면 특정 천공작업 시 파쇄 효율 극대화를 위한 드릴비트 버튼의 최적설계가 가능할 것으로 사료된다. 예를 들어, 천공 파쇄 효율측면에서 버튼을 설계한다면 중복타격 면적과 비 타격면적에 높은 가중치를 줄 수 있고 그 결과 두 번째 모델의 버튼설계가 상대적으로 가장 우수하다고 판단할 수 있다.

5. 결론

암반 천공에 사용되는 드릴비트의 버튼배열을 정량적으로 평가하기 위하여 중복타격 면적, 비 타격 면적 그리고 모멘트를 활용한 버튼배열 평가방법을 제안하였고, 기존의 드릴비트 모델에 이를 적용하여 적합성을 확인하였다. 이러한 버튼배열 평가방법은 단순히 기존 버튼배열의 문제점을 분석하는데 사용할 수도 있으며, 최종적으



(a) Overlapped & Blank area of three models



(b) Drilling deviation moment of three models

Fig. 9 Performance evaluation results of three conventional drill bit model

로는 설계목적에 따라 평가지표에 적절한 가중치(weighting coefficient)를 부여하여 중복타격 면적, 비 타격 면적, 모멘트가 최소가 되는 최적의 버튼배열을 찾는 데 사용할 수도 있다.

하지만 본 연구에서는 정면의 6개의 버튼에 대해서만 평가지표를 사용하였기 때문에 이후에 연구에서 이를 확장하여 모든 버튼배열을 평가할 필요가 있다. 또한, 중복타격 면적과 비 타격 면적은 선행타격에 대한 영향을 고려하지 않고 평평하고 깨끗한 이상적인 암반 표면을 연속적으로 타격한 결과를 계산한 것이므로 이후의 연구에서 선행타격에 대한 영향을 추가적으로 고려하여 본 연구를 보완할 필요가 있다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 기술사업화과제와

한국생산기술연구원 기관고유사업의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) EVERDIGM, "http://www.everdigm.com," Top-Hammer Drill Rigs Product Catalogue
- (2) Kwon, K. B., Song, C. H., Park, J. Y., Oh, J. Y., Lee, J. W. and Cho, J. W., 2013, "Evaluation of Drilling Efficiency by Percussion Testing of a Drill Bit with New Button Arrangement," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.15, No.6, pp.1063~1068.
- (3) Kwon, K. B., Song, C. H., Park, J. Y., Shin, D. Y., Cho, J. W., and Cho, S. H., 2013, "Rock Fragmentation Assessment of a Drill Bit by Hopkinson Bar Percussion Test," *Tunnel & Underground Space*, Vol. 23, No. 1, pp. 42~53.
- (4) Kwon, K. B., Song, C. H., Lee, J. W., Park, J. Y., Oh, J. Y. and Cho, J. W., 2013, "Drilling Efficiency Investigation of a Drill Bit by Piston-Drop Test," *The Korea Society of Fluid Power & Construction Equipment Conference*, Vol. 2013, No. 6, pp. 15~20.
- (5) Patil, S. B. and Bodhe, S. K., 2011, "Betel Leaf Area Measurement Using Image Processing," *International Journal of on Computer Science and Engineering*, No. 7, Vol. 3, pp. 2656~2660.
- (6) JUNJIN CSM Co., 2010, "Hydraulic Crawler Drill."