

연마재 워터젯 암석절삭을 위한 결합 노즐의 기하학적 변수 영향

오태민¹, 조계춘^{2*}

Effects of geometric parameters of a combined nozzle for rock cutting using an abrasive waterjet

Tae-Min Oh, Gye-Chun Cho

ABSTRACT Inserting a nozzle assembly into a removed cutting space during a continuous cutting operation is necessary in rock excavation using an abrasive waterjet. In this study, a combined two nozzle assembly is used to secure enough removal width. The shape of the cut space is affected by the geometric parameters (standoff distance, nozzle angle, and vertical distance between the nozzle tips) of the combined nozzle assembly. Abrasive waterjet cutting tests are performed with various geometric parameters for granite rock specimens. Optimized geometric parameters for the nozzle inserting process are determined and verified through the experimental tests.

Keywords: Abrasive waterjet, waterjet nozzle, geometric parameter, rock cutting, cutting shape

요약 연마재 워터젯을 이용하여 암반을 굴착하기 위해서는 노즐이 삽입되고 절삭하는 연속적 공정이 요구된다. 본 연구에서는 노즐이 삽입되기 위한 충분한 절삭 폭을 확보하기 위해 한 쌍의 연마재 워터젯 노즐을 이용하여 암석 절삭실험을 실시하였다. 한 쌍의 노즐형태와 위치에 따른 기하학적 변수에 따라 암석 절삭형상과 절삭 폭이 달라지는 것을 확인하였다. 정의된 기하학적 변수에 따라 절삭 깊이 및 폭을 측정하여 암반에 형성되는 절삭단면 형상을 분석하였다. 그 중 노즐 삽입이 가능한 기하학적 변수를 제시하고 현장적용 가능성에 대해 검증하였다.

주요어: 연마재 워터젯, 워터젯 노즐, 기하학적 변수, 암반절삭, 절삭형상

접수일(2012.09.03), 수정일(2012.09.17), 게재확정일(2012.09.20)

¹정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사 후 연구원

²정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수

*교신저자: 조계춘 (E-mail: gyechun@kaist.edu)

1. 서론

도심지의 효율적인 공간활용을 위해 지하공간의 구축은 필수적이다. 특히 좁은 국토를 가진 국내의 실정에서는 도심지의 공간활용이 무엇보다 중요하기 때문에 지하철교통망이나 편의시설 등 다양한 지하구조물을 필요로 한다. 그러나 도심지의 지하공간 시공과정에서 발생하는 굴착 진동은 주변 지반 및 구조물에 균열을 발생시켜 공사 주변지역의 안정성을 저하시킨다(신중호 등, 2009). 특히 발파를 이용한 암반굴착의 경우, 다수의 천공작업과 발파(또는 화약사용)에 의한 암반굴착 시 발생하는 진동은 심각한 수준이다(홍의준 등, 2010).

연마재 워터젯은 연마재와 고압의 물을 이용하여 굴착작업을 수행하기 때문에 친환경적이다. 그리고 비접촉식으로 대상암반에 타격이 가능하기 때문에 대상지반 주변에 굴착진동이 매우 작다는 장점이 있다(Wang, 2003). 또한 계획된 형상을 정확하게 굴착(절삭)할 수 있기 때문에 발파공법에서 문제가 되는 여굴과 미굴이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 이러한 장점들로 인해 최근 워터젯은 굴착분야에서 다양하게 적용되고 있다(김정근과 박태동, 2003; 김정규와 송재준, 2012; Oh et al., 2012). 대상 암반단면을 굴착하기 위해서는 연마재 워터젯을 이용한 다수의 절삭공정이 필요하다. 그러므로 암반에 대한 연마재 워터젯의 절삭성능과 효율은 공사비용과 시간의 측면에서 매우 중요하다.

노즐혼합형 연마재 워터젯 시스템에 있어서, 암석절삭과 관련한 노즐의 이송속도, 수압, 연마재 종류 등에 따른 절삭성능 연구는 많이 이루어져 왔다. 그러나 기존의 노즐 혼합형 연마재 워터젯을 이용한 연구는 단일 노즐을 이용한 암석절삭을 수행하여, 현장 암반에 적용하기에는 노즐 삽입에 대한 한계가 있다(선우춘 등, 1996; 오태민과 조계춘, 2012; Karakurt et al., 2012). 예를 들어 실제 터널굴착 현장이라면, 터널길이가 수 백 미터에서 수 킬로에 이르기 때문에 절삭된 공간에 노즐이 삽입 및 전진되어야 하고 동시에 연속적인 절삭작업이 필요하다. 이와 같이 단수의 노즐을 사용하면 충분한 절삭 폭을 확보하기 어려워 삽입이 거의 불가능하다. 최병희와 양형식(2001)의 연구에서 다수의 노즐을 이용한 회전식 슬로터에 대한 절삭실험을 수행하였으나, 연마재를 사용하지 않는 순수 워터젯을 사용하였기 때문에 상대적으로 낮은 암반절삭 효율로 인한 한계점이 있다. 그러므로 현장 적용을 위한 암반굴착(절삭)에 있어서 연마재를 투입할 수 있는 다수의 노즐을 결합하여 노즐 삽입에 필요한 절삭 폭을 확보하는 동시에 충분한 절삭효율을 가져야 한다. 노즐이 많이 결합될수록 절삭 폭의 확보와 절삭 효율의 측면에서 유리하지만 다수의 노즐은 그만큼 많은 유량을 요구하기 때문에 고가의 펌프가 요구된다.

본 연구에서는 한정된 유량에서 결합할 수 있는 최대 노즐 개수를 두 개로 결정하여 경암(화강암)에 대해 노즐혼합형 연마재 워터젯 절삭실험을 수행하였다. 결합된 두 개 노즐의 기하학적 변수에 따라 절삭 성능 및 절삭 형상이 달라지기 때문에 실험변수를 이격거리, 노즐 간 각도, 그리고 노즐 간 수직거리로 결정하여 절삭실험을 수행하였다. 실험결과를 토대로, 노즐 삽입이 가능한 기하학적 변수를 제시하였다.

2. 기하학적 변수의 정의

결합된 한 쌍의 노즐에서, 워터젯의 절삭 성능 및 형상은 기하학적 변수에 의해 결정된다. 기하학적 변수는 크게 노즐 간의 거리와 각도 그리고 노즐과 대상암반과의 거리와 각도로 나눌 수 있다. 본 연구에서의 기하학적 변수를 노즐 끝(tip) 간 수직거리(VD), 노즐 간 각도(2θ), 그리고 노즐과 대상 암반과의 이격거리(SOD)로 정의하였다(그림 1). 특히 노즐 각의 정의에 있어서, 각각의 노즐 각의 크기가 동일하도록 설치되었기 때문에 각각의 노즐 각(θ)을 합한 한 쌍의 노즐이 이루는 각($\theta+\theta$)을 2θ 로 정의하였다.

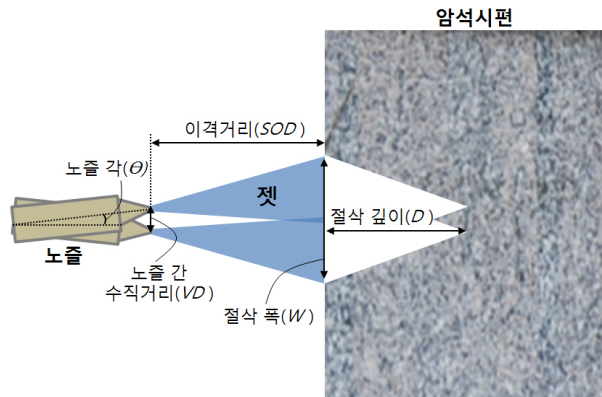


그림 1. 결합된 워터젯 노즐에서 기하학적 변수와 측정지표의 정의

3. 실내실험 방법 및 준비

3.1 실험 방법

기하학적 변수에 대한 실험을 위해, 기하학적 변수를 제외한 워터젯 에너지 생성과 관련된 변수는 수압 250 MPa, 연마재 투입량 104 g/s, 유량 17.7 l/min, 그리고 이송속도 10 mm/s로

고정하였다. 먼저, 기하학적 이격거리(*SOD*)와 수직거리(*VD*)에 따른 암석 절삭성능 및 형상을 분석하기 위해 한 쌍의 노즐을 평행하게 설치($\theta=0$)하여 이격거리와 수직거리에 따른 절삭실험을 실시하였다. 그리고 노즐 간 각도(2θ)에 대한 기하학적 변수 조정을 위해 각각의 노즐을 동일한 각도로 아래와 위쪽 방향으로 설치하였다. 노즐 간 각도(2θ)는 0, 2, 그리고 4°로 조정되어 암석 절삭을 실시하였다. 각각의 노즐각에서 노즐 끝간 수직거리를 0에서 약 40 mm까지 변화시키고 노즐의 이격거리는 100, 200, 그리고 300 mm로 변화시키며 절삭실험을 수행하였다. 한편 모든 실험 경우(test cases)에 대해, 노즐 간 수평거리(*HD*)는 한 쌍의 노즐에서 생성되는 각각의 젓 간섭을 최소화하기 위해 100 mm로 충분히 떨어진 상태로 고정하여 실험을 실시하였다. 기하학적 변수에 따른 실험은 총 17 경우로 표 1과 같다.

실험결과에서 절삭 깊이는 굴진성능을 반영하고, 절삭 폭은 노즐삽입이 가능한지 판단하는데 중요한 근거가 된다. 그러므로, 암석에 대한 연마재 워터젓의 절삭성능 지표는 절삭 깊이와 절삭 폭으로 설정하여 각각 5번 이상 측정하여 평균값으로 획득하였다(측정한 값들은 평균값으로부터 $\pm 10\%$ 이내의 범위를 가짐).

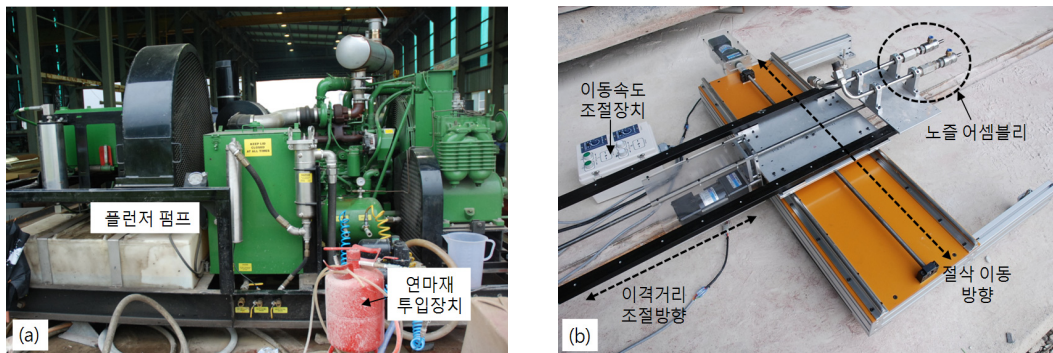
표 1. 절삭실험 변수

| Case # | 수압 [MPa] | 연마재 투입량 [g/s] | 유량 [l/min] | 이송속도 [mm/s] | 수평거리, <i>HD</i> [mm] | 노즐 간 각도, 2θ [°] | 이격거리, <i>SOD</i> [mm] | 수직거리, <i>VD</i> [mm] |
|--------|-------------|---------------------|---------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | 250 | 104 | 17.7 | 10 | 100 | 0 | 100 | 0 |
| 2 | | | | | | 0 | 100 | 5 |
| 3 | | | | | | 0 | 100 | 17 |
| 4 | | | | | | 0 | 100 | 29 |
| 5 | | | | | | 0 | 100 | 42 |
| 6 | | | | | | 0 | 200 | 5 |
| 7 | | | | | | 0 | 200 | 17 |
| 8 | | | | | | 0 | 200 | 29 |
| 9 | | | | | | 0 | 300 | 5 |
| 10 | | | | | | 0 | 300 | 17 |
| 11 | | | | | | 0 | 300 | 29 |
| 12 | | | | | | 2 | 300 | 13 |
| 13 | | | | | | 2 | 300 | 16 |
| 14 | | | | | | 2 | 300 | 18 |
| 15 | | | | | | 2 | 300 | 28 |
| 16 | | | | | | 4 | 300 | 10 |
| 17 | | | | | | 4 | 300 | 25 |

3.2 실험 준비

연마재 워터젯 암석 절삭실험은 플런저 펌프(plunger pump), 연마재 투입장치, 두 개의 노즐이 결합된 노즐 어셈블리(nozzle assembly), 그리고 절삭을 위한 노즐 이동장치로 구성된다(그림 2). 먼저 두 개의 노즐을 정해진 각도와 수직거리가 되도록 고정한 후 초기 이격거리로 위치시킨다. 플런저 펌프를 가동하여 고압수를 생성하고, 연마재 투입장치에서 노즐 어셈블리로 일정한 연마재를 공급하여 고압의 연마재 혼합수를 생성한다. 생성된 고압 혼합수는 포커싱 노즐을 통해 대상암반을 정확히 타격한다. 사용된 연마재는 입경 #30-40 mesh(D_{50} : 0.55 mm)인 석류석(garnet, $Fe_2O_3Al_2(SiO_4)_3$)을 사용하였다. 실험에 사용된 연마재의 물리적 특성은 모스 경도 7.5-8.5로 매우 단단하며 비중은 약 4.0이다. 한편, 실험에 사용된 고압펌프와 노즐 어셈블리의 제원은 표 2와 같다.

절삭실험을 위한 이동장치를 제작하여 워터젯 노즐을 수평방향으로 일정하게 이동 가능하게 하였다(그림 2(b)). 실험에 사용된 암석시료는 신선한 화강암으로 가로 200 mm, 세로 200 mm, 그리고 폭 300 mm인 블록(block)형태로 제작되었다. 사용된 화강암 시편의 물리적 특성은 표 3과 같다.



(a) 플런저 펌프와 연마재 투입장치 (b) 노즐 어셈블리와 이동장치

그림 2. 연마재 워터젯을 이용한 암석 절삭실험 장비구성

표 2. 고압펌프와 노즐 어셈블리 제원

| 펌프 종류 | 동력 (HP) | 펌프 최대 생성압력 (MPa) | 펌프 최대 생성유량 (l/min) | 포커싱 노즐직경 (mm) | 오리피스 노즐직경 (mm) |
|----------------|---------|------------------|--------------------|---------------|----------------|
| Diesel plunger | 240 | 275 | 31 | 2.29 | 0.61 |

표 3. 화강암시료의 물리적 특성

| 암석 종류 | 건조밀도 (kN/m^3) | 공극률 (%) | 흡수율 (%) | 일축압축강도 (MPa) | P파 속도 (m/s) |
|-----------|-------------------|---------|---------|--------------|-------------|
| 화강암 (황등석) | 25.68 | 0.7 | 0.27 | 196.4 | 3394 |

4. 실험 결과 및 분석

한 쌍의 노즐을 이용하여 기하학적 변수에 따라 분사되는 젯(jet)의 전형적인 모습은 그림 3과 같다. 노즐 각에 의해 분사되는 젯이 각각 상하로 향하여 절삭 폭을 증가시키는 것을 관찰 할 수 있다. 이와 같이 적절한 이격거리, 노즐 간 수직거리, 그리고 노즐 각의 범위에서, 워터젯에 의한 절삭형태는 충분히 삽입 가능한 형상이 된다. 만약 삽입에 필요한 기하학적 변수가 만족되지 못하면 그림 4와 같이 가운데 부분이 제거되지 못해 삽입 불가능한 절삭형상이 발생된다. 삽입 가능한 기하학적 변수를 결정하기 위해 이격거리, 노즐 간 수직거리, 그리고 노즐 각에 따른 절삭특성을 분석하였다.

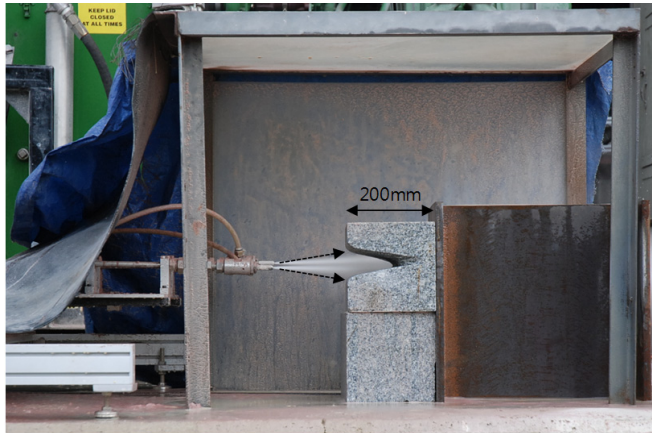


그림 3. 결합된 노즐을 이용한 연마재 워터젯의 암석시편 절삭

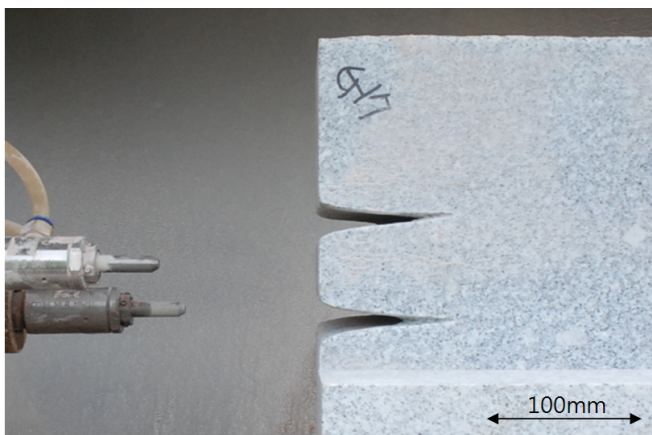


그림 4. 결합된 노즐에서 생성된 노즐삽입이 불가능한 절삭형태

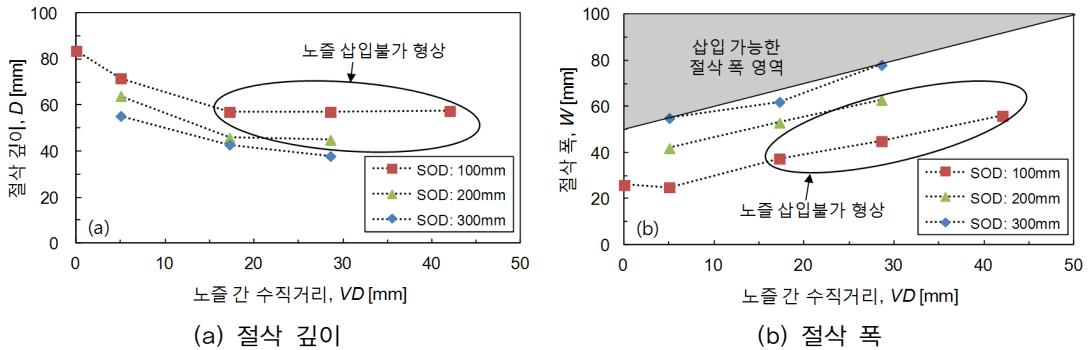


그림 5. 노즐각 0°의 조건에서 이격거리에 따른 절삭결과

4.1 이격거리에 따른 절삭특성

한 쌍의 노즐에서 이격거리에 따른 절삭영향을 확인하기 위해 각각의 노즐을 수평으로($\theta=0^\circ$) 설치하여 암석 절삭실험을 실시하였다. 그림 5(a)는 이격거리가 증가함에 따라 절삭 깊이가 감소하는 것을 보여준다. 본 실험의 조건에서 이격거리가 100 mm에서 300 mm로 증가함에 따라 절삭 깊이는 평균적으로 약 17 mm 감소하였다. 반면에 절삭 폭은 약 30 mm로 상당히 증가하였다. 그림 5(b)는 이격거리가 증가함에 따라 절삭 폭 증가를 명확하게 보여준다. 수행된 결과를 살펴보면, 이격거리 300 mm일 때는 노즐 삽입이 대부분 가능한 형상이지만, 이격거리가 100 mm로 감소함에 따라 노즐 삽입 불가능 형상판정이 많아짐을 확인할 수 있다.

이격거리가 100 mm 일 때, 노즐 간 수직거리가 17 mm 이상이면 그림 4와 같이 노즐 삽입이 불가능한 형상을 보였다. 그러나 이격거리가 200 mm 이상으로 충분히 크면 17 mm의 수직거리 조건에서 삽입이 가능한 형상을 보였다. 이와 같은 결과는 낮은 이격거리에서는 젯의 분사 정도가 작기 때문에, 대상 암석의 표면에 생성된 각각의 젯 분사반경이 충분히 중첩되지 않아 삽입 가능한 형상이 나타날 확률이 감소함을 보여준다.

4.2 노즐 각에 따른 절삭특성

안정적인 절삭 폭을 확보하면서 노즐이 삽입되기 위해서는 앞서 서술한 바와 같이 두 개의 노즐이 상하방향으로 각을 이루어야 한다. 노즐 각(2θ)을 증가시켜 절삭 깊이와 절삭 폭을 측정하여 노즐 각의 영향을 분석하였다. 한 쌍의 노즐 각이 0° 일 때 절삭 깊이는 가장 깊게 형성되었으나, 절삭 폭은 가장 작게 형성되었다(그림 6). 반면에 노즐 각을 4° 로 증가시키면, 노즐 각 0° 결과와 비교하여 형성되는 절삭 폭은 증가하고 절삭 깊이는 감소하는 경향을 보였다. 그러나 노즐 삽입이 불가능한 형상에서는 노즐 각이 증가하여도 절삭 깊이는 일정한 것으로 관찰되었다.

그림 6(b)는 동일한 기하학적 변수에서 한 쌍의 노즐 각이 0°에서 4°로 증가함에 따라 절삭 폭은 약 15 mm가 추가적으로 증가하는 것을 보여준다. 이와 같은 결과는, 단위 시간 당 노즐에서 뿜어져 나오는 워터젯 에너지는 동일하기 때문에 절삭 깊이에 집중(예를 들어 노즐각 0도 조건) 할수록 절삭 폭의 확보에서는 불리하게 작용하고, 절삭 폭의 확보에 집중(예를 들어 노즐각 4° 조건) 할수록 깊은 절삭 깊이의 형성은 어려워지기 때문에 발생하는 것으로 분석된다.

4.3 노즐 간 수직거리에 따른 절삭특성

노즐간 수직거리는 노즐의 끝(tip)과 다른 노즐의 끝(tip) 간의 수직거리를 의미한다. 일반적으로 노즐 간 수직거리가 가까워지면 두 개의 노즐로부터 나오는 워터젯이 한 목표점에 타격될 확률이 높아져 절삭 깊이는 깊어진다(그림 6(a)). 만약 삽입이 불가능한 형상이 형성될 만큼 노즐 간 수직거리가 커지면 절삭 깊이는 노즐 간 수직거리에 상관없이 수렴하게 된다(그림 5(a)). 노즐 간 수직거리가 가까워짐에 따라 절삭 깊이가 증가하는 것은 한 쌍의 노즐에서 분사된 두 개의 젯이 암석표면에서 충분히 중첩되어 깊이 제거에 있어서 보다 효율적이기 때문이다.

노즐 간 수직거리가 증가하면 한 쌍의 노즐에서 제거되는 절삭 폭이 증가하여 노즐을 삽입하는데 있어서 유리하다. 동일한 이격거리의 조건에서, 절삭 폭은 노즐 간 수직거리가 증가함에 따라 증가하는 것을 그림 6(b)에서 확인 할 수 있다. 그러나 노즐 간 수직거리가 과도하게 멀어지면, 두 개의 노즐에서 생성되는 각각의 젯은 독립적인 절삭을 수행하게 되어 한 쌍의 노즐 결합에 대한 의미가 없어진다. 그림 4는 과도한 노즐 간 수직거리에 따른 노즐 삽입 불가능 형태를 보여준다.

최적화된 노즐 간 수직거리의 결정은 이격거리의 길이에 영향을 받는다. 그림 5(b)에서 이격거리가 100 mm 일 때 노즐 간 수직거리는 5 mm까지 삽입이 가능한 절삭형태를 보였다. 200 mm 일 때는 노즐간 수직거리 17 mm까지 삽입이 가능하였고, 300 mm 일 때는 노즐 간 수직거리 29

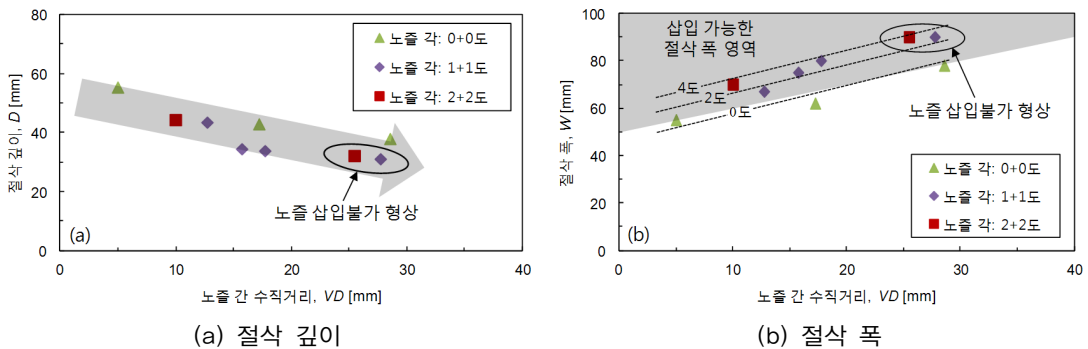


그림 6. 이격거리 300 mm의 조건에서 노즐 각에 따른 절삭결과

mm 까지 삽입이 가능한 절삭형태가 관찰되었다. 이와 같이 이격거리가 증가하면 삽입 가능한 노즐 간 수직거리는 증가한다.

또한 노즐 각의 크기는 삽입 가능한 형태를 생성하기 위한 노즐 간 수직거리에 영향을 미친다. 그림 6(b)는 이격거리 300 mm와 노즐 각 0도의 기하학적 변수조건에서 노즐 간 수직거리 29 mm는 삽입 가능한 절삭형태를 보인다. 그러나 2°와 4°로 노즐 각(2θ)이 변경됨에 따라 노즐 간 수직거리 29 mm에서는 삽입이 불가능함을 보인다. 이와 같이 노즐 각이 증가하면 삽입이 허용되는 노즐 간 수직거리가 감소함을 알 수 있다.

5. 노즐 삽입이 가능한 기하학적 변수 및 절삭효율

노즐의 삽입에 있어서 생성되는 절삭 형상과 절삭 폭의 크기가 삽입 유무의 기준이 된다. 기하학적 변수의 최적화는 절삭 단면이 삽입 가능한 형상인지 우선 고려되어야 한다. 만약 삽입이 가능한 형상이라면 노즐이 삽입되기 위해서 절삭 폭이 노즐 어셈블리 보다는 크다는 조건이 성립되어야 한다. 사용된 단수의 노즐 어셈블리 크기는 직경이 약 40 mm 이다. 두 개의 노즐을 결합할 시, 노즐 각이 클수록 중첩되는 부분이 존재하기 때문에 전체적으로 약간 작게 제작할 수 있다. 노즐 각이 없는 상태가 가장 큰 직경을 가진 노즐 어셈블리로 제작되기 때문에 본 연구에서는 0° 일 때의 노즐 직경을 삽입기준으로 결정하였다. 수직거리가 존재하지 않는 평행한 위치에서, 원활한 삽입을 위해 여유 폭을 10 mm를 둔다면 삽입에 필요한 절삭 폭은 50 mm가 필요하다. 노즐의 어셈블리 크기는 수직거리가 커짐에 비례적으로 크게 제작된다. 예를 들어, 노즐의 수직거리를 20 mm 로 결정 한다면 필요한 절삭 폭은 수직거리만큼 추가된 70 mm가 요구된다. 삽입 가능한 절삭 폭 영역을 그림 5(b)와 6(b)에 표시하였다. 노즐 각이 0° 일 때, 노즐 삽입이 가능한 형상은 존재하지만 삽입 가능한 절삭 폭은 충분하지 않는 것을 확인 할 수 있었다(그림 5(b) 참조). 그러나

표 4. 삽입 가능한 노즐의 기하학적 변수

| Case # | 12 | 13 | 14 | 16 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| 노즐 간 각도, 2θ [°] | 2 | 2 | 2 | 4 |
| 이격거리, <i>SOD</i> [mm] | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 수직거리, <i>VD</i> [mm] | 13 | 16 | 18 | 10 |
| 수평거리, <i>HD</i> [mm] | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1회 절삭 깊이 [mm] | 43.5 | 34.4 | 33.8 | 44.3 |
| 면적 절삭율 [mm^2/s] | 435 | 344 | 338 | 443 |

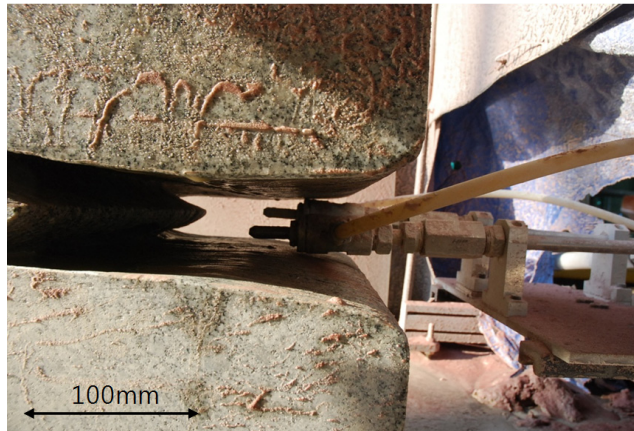


그림 7. 기하학적 최적변수에서의 연속적 암석절삭에 따른 노즐삽입 검증

이격거리 300 mm에서는 근접적으로 삽입 가능성을 확인 할 수 있었다. 이격거리가 300 mm이고 노즐 각이 존재하는 경우, 노즐 삽입 형상과 삽입 가능한 절삭 폭을 가진 조건을 만족시키는 기하학적 변수의 조합은 총 4가지 실험 경우(test cases)로 확인 되었다(그림 6(b) 참조). 결합된 노즐 어셈블리가 삽입 가능한 기하학적 변수 조합은 표 4와 같다.

현장적용 가능성을 위해서 절삭 효율 검토는 필수적이다. 최적화 된 변수의 조합에서 절삭 효율은 이송속도와 절삭깊이의 곱으로 표현되는 면적 절삭율로 정의 할 수 있다(최병희와 양형식, 2001). Case 16의 경우가 본 실험의 다른 경우들과 비교하면 면적 절삭율이 $443 \text{ mm}^2/\text{s}$ 로 가장 효율이 좋은 것으로 확인되었다(표 4 참조). 특히 최병희와 양형식(2001)의 연구에서 제안한 연마재를 사용하지 않는 워터젯 슬로터에 의한 실험결과와 비교하면 Case 16 경우의 절삭 효율이 약 3-11배 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 연마재의 투입이 암석절삭 효율에 상당한 영향을 미친다는 것을 간접적으로 보여준다.

암반절삭 시 연속적인 삽입 및 절삭 가능성을 확인하기 위해 기하학적 변수(Case 14)로 도출된 이격거리 300 mm, 한 쌍의 노즐 각 2° , 그리고 노즐 간 수직거리 18 mm에서 검증실험(15회 연속 절삭수행)을 실시하였다. 설정된 이격거리 300 mm은 절삭되는 깊이만큼 전진시켜 유지되도록 하였다. 검증실험 결과, 연속적인 절삭과 동시에 삽입이 가능함을 확인 할 수 있었다(그림 7).

6. 결 론

본 연구에서는 기하학적 변수에 따른 암석의 절삭형상을 알아보기 위해 두 개의 연마재 워터젯

노즐을 결합하여 절삭 실내실험을 수행하였다. 절삭형상에 따라 노즐 삽입이 가능한 변수에 대해 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 삽입이 가능한 형상의 기하학적 변수에서, 이격거리가 높을수록, 노즐 간 수직거리가 클수록, 그리고 노즐 각이 클수록 절삭 깊이는 감소하고 절삭 폭은 증가하는 경향을 확인하였다. 그러나 지나친 노즐 간 수직거리와 노즐 각은 절삭 폭이 크지만 불가능한 절삭 형태가 발생할 수 있다.
2. 노즐이 삽입가능하기 위해서는 두 가지 조건인 삽입 가능한 형상과 삽입에 필요한 절삭 폭을 만족시켜야 한다. 삽입 가능한 형상의 측면에서, 이격거리 300 mm은 낮은 이격거리 보다 유리한 것으로 판단된다. 절삭 폭의 측면에서, 노즐 각이 0° 일 때는 노즐 어셈블리가 커져서 삽입에 불리하기 때문에 일정 노즐 각을 두는 것이 유리한 것으로 판단된다.
3. 그러므로 연마재 워터젯을 이용한 암반 절삭 시, 삽입 가능한 형태가 형성되면서 노즐 어셈블리 보다 큰 절삭 폭을 확보할 수 있는 기하학적 변수를 다음과 같이 제안 할 수 있다. 1) 이격거리 300 mm 그리고 노즐 각 2° 일 때, 노즐 간 수직거리 13-18mm 의 범위 또는 2) 이격거리 300 mm, 노즐 각 4° 일 때, 그리고 노즐 간 수직거리 10 mm의 기하학적 변수에서 결합된 노즐 어셈블리의 삽입이 가능하다.
4. 절삭효율은 이격거리 300 mm, 노즐 각 4°, 그리고 노즐 간 수직거리 10 mm의 기하학적 노즐변수 조합에서 443 mm²/s로 가장 높은 면적 절삭율을 보였다.
5. 본 연구에서는 실내실험의 한계상 실제 암반지반에 대해 동일하게 모사를 하지 못하였지만 추후 연마재 워터젯을 이용한 암반 굴착시 필요한 절삭용 노즐을 개발할 때 기초 자료로 활용할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원(KAIST) Preparatory Project(N1011021)와 지식경제부 2012년 특구 기술사업화사업(관리번호 37-기-04)의 연구비지원에 의해 이루어졌음에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김정규, 송재준 (2012), “연마재 워터젯 노치 절삭 방법을 이용한 터널 발파 진동 저감”, 한국암반공학회 2012 춘계 학술발표회 논문집, pp. 89-92.

-
2. 김정근, 박태동 (2003), “워터젯 보조명판이 장착된 마이크로터널링 머신의 효용성에 관한 연구”, 한국터널공학회 2003년 정기학술발표회 논문집, pp. 242-256.
 3. 선우춘, 최병희, 류창하, 권광수 (1996), “Water jet 절단에서의 연마재 종류별 성능 비교 시험”, 터널과 지하공간, 제6권, pp. 175-183.
 4. 신중호, 문훈기, 최규철, 김태균 (2009), “터널라이닝 안전관리를 위한 발파제한영역 평가”, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 85-95.
 5. 오태민, 조계춘 (2012), “연마재 워터젯 변수가 암석제거에 미치는 영향”, 한국터널공학회 논문집, 제14권, 제4호, pp. 421-435.
 6. 최병희, 양형식 (2001), “워터젯을 이용한 암석의 슬롯절삭에 관한 연구”, 대한화약기술학회지, 제19권, pp. 247-258.
 7. 홍의준, 장석부, 송기일, 조계춘 (2010), “발파시 터널 슛크리트의 최대입자속도와 부착상태평가 분석”, 한국터널공학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 247-255.
 8. Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K. (2012), “An experimental study on the depth of cut of granite in abrasive waterjet cutting”, Material and Manufacturing Processes, Vol. 27, No.5, pp. 538-544.
 9. Oh, T.M., Cho, G.C., Song, K.I., Ji, I.T. (2012), “A new rock excavation method using an abrasive waterjet to minimized excavation damaged zone”, Proceedings of World Tunnel Congress 2012, Bangkok, Thailand, pp. 340-341.
 10. Wang, J. (2003), “Abrasive waterjet machining of engineering materials”, Trans Tech Publications Ltd., Switzerland, pp. 5.