

# 연마재 워터젯 변수가 암석제거에 미치는 영향

오태민<sup>1</sup>, 조계춘<sup>2\*</sup>

## Effect of abrasive waterjet parameters on rock removal

Tae-Min Oh, Gye-Chun Cho

**ABSTRACT** Rock excavation (removal) tests are performed with effective parameters using an abrasive waterjet. For verification of the field rock excavation capabilities, the removal performance and level of efficiency are analyzed for hard granite rock in terms of the water pressure, exposure time of the jet, and the standoff distance. In particular, experimental tests are performed with a long standoff distance required condition in the real excavation field. The rock removal performance level changes according to the rock properties. In this study, various rock specimens are used and P-wave velocities are measured in order to determine the correlation between the removal performance and the P-wave velocity. As a result of the experimental study, the effect of waterjet parameters on rock removal is analyzed.

**Keywords:** Abrasive waterjet, waterjet parameter, rock excavation, standoff distance, P-wave velocity

**요 약** 연마재 워터젯을 이용하여 다양한 영향변수에 따라 암석시편에 굴착(제거)실험을 수행하였다. 현장암반굴착 가능성을 판단하기 위해 신선한 경암(화강암) 시편을 기준으로 수압, 노출시간, 그리고 이격거리에 따라 굴착성능 및 굴착형상을 분석하였다. 특히 이격거리는 현장에서 요구하는 높은 수준의 조건에서 실험을 실시였다. 추가적으로 암석에 따른 굴착성능을 비교하기 위해, 실제 굴착현장에서 획득한 암석시편을 대상으로 P파 속도를 측정하여 동일한 조건에서 워터젯 실험을 수행하였다. 획득된 실험결과로부터 워터젯 변수가 암반제거에 미치는 영향을 분석하였다.

**주요어:** 연마재 워터젯, 워터젯 변수, 암반굴착, 이격거리, P파 속도

---

접수일(2012.07.13), 수정일(2012.07.21), 게재확정일(2012.07.25)

<sup>1</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수

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

## 1. 서론

기존 도시가 팽창함에 따라 한정된 구역에서 효율적인 지하공간의 이용은 매우 중요하다. 도심지의 지하교통망 구축이나 건물의 지하공간 확보에 있어서 암반굴착은 필수적이다. 현재 국내의 주된 암반터널굴착 방법은 NATM(New Austrian Tunneling Method)으로 시공비용이 비교적 저렴하고 굴착효율이 높은 장점을 가지고 있지만, 발파시 진동수준이 높아 주변지반과 건물의 피해로 인하여 많은 민원이 발생하고 있다. 그러므로 지반 굴착시 주변에 발생하는 굴착진동의 제어는 매우 중요하다(황학과 이태노, 2002; 홍의준 등, 2010).

워터젯 기술은 70년대 이후 상용화되어 암석, 금속, 플라스틱의 가공분야와 관로의 세척, 표면박리 등을 목적으로 하는 세정분야에서 주로 사용되어 왔다(Summers, 1995). 최근에는 연마재를 주입하여 충격 압력을 배가시켜 파쇄하는 기술이 주로 활용되고 있다. 기존 물만 사용하는 순수 워터젯의 경우, 액체와 공기의 두가지상(two phases)으로 혼합되어 젯이 생성되지만, 연마재 워터젯은 연마재를 포함한 세가지상(three phases)으로 혼합 분사되어 파쇄 효율이 높다.

연마재 워터젯 기술은 재료를 제거하는 과정에 있어서 주변에 추가적인 응력과 열이 발생하지 않는 장점이 있다. 또한 물과 연마재만으로 재료가 제거되기 때문에 친환경적이다. 이러한 장점으로 인해 최근 워터젯 기술은 지반굴착이나 시추에 다양하게 활용되고 있다(Summers, 1992; 김정근과 박태동, 2003; Gensheng et al., 2007; Kim et al., 2012). 국내 암반분야에서 암석의 천공 및 절단과 관련하여, 다양한 영향인자와 워터젯 효율성과의 상관관계 연구는 주로 증압기(intensifier) 펌프를 이용하여 수행되어져 왔다(선우춘 등, 1994; 최병희 등, 2001).

그러나 정교한 절삭에 특화된 시스템인 증압기 형태의 펌프를 이용한 실험은 현장적용을 검증하는데 있어서 제한적이다. 왜냐하면 증압기 형태의 펌프는 4,000 bar 이상의 초고압 생성은 가능하나 유량이 매우 한정적이기 때문이다. 워터젯 유량이 증가하면 젯의 에너지가 증가하기 때문에 짧은 시간에 더욱 효율적인 재료파쇄가 가능하다(Momber, 2004). 또한 현장굴착에 있어서, 고유량 워터젯 펌프를 사용하여 다수의 노즐을 운용하는 것은 굴착시공시간을 단축시키는 측면에서 매우 경제적이다.

본 연구에서 사용된 워터젯 시스템은 건식 시스템으로서 노즐 입구에서 연마재를 투입하는 방식으로 시스템이 간단하여 현장적용에 용이하다는 장점이 있다. 노즐 내부로 투입된 연마재는 고속 수류에 의해 가속되어 높은 운동에너지를 가진다(Momber, 2004). 이와 같이 생성된 연마재의 운동에너지는 연속적인 타격에 의해 미세한 균열을 발생시킴으로써 암석과 같은 취성재료를 파괴한다(Evans et al., 1978; Zeng and Kim, 1996).

현장 암반굴착은 대상표면이 고르지 못하기 때문에 기존의 재료절삭과 비교하여 높은 이격거리(노즐과 대상물질과의 거리)가 요구된다. 기존의 암석절삭은 mm단위 이하의 정교한 절삭을 요구하기 때문에 주로 짧은 이격거리에서 작업이 요구된다. 그러나 실제 암반굴착 현장에서는 정교한 절삭 효과보다는 높은 제거효율이 중요하고, 짧은 이격거리(10 cm미만)에서는 현장여건상 굴착작업을 운용하는 것이 거의 불가능하기 때문에 최소 10 cm이상의 이격거리 확보가 필수적이다.

본 연구에서는 고유량 생성이 가능한 플런저(plunger) 형태의 펌프를 이용하여 다양한 암석에 대해 젯의 수압과 노출시간에 따라 암석제거 성능에 관한 실험을 수행하였다. 특히, 현장에서 요구하는 10 cm이상의 이격거리에서 실험을 실시하여, 제거되는 깊이, 폭, 그리고 부피를 측정하여 그 결과를 분석하였다.

## 2. 실험 구성 및 준비

연마재 워터젯 실험은 고압수에 연마재를 일정하게 투입하여, 대상 암석시편에 일정시간 타격을 가하며 실시하였다. 워터젯의 중요 변수인 수압, 노출시간, 이격거리, 그리고 암석의 탄성과 속도에 따라 실내실험을 수행하였다. 암석의 탄성과 속도에 따른 실험을 제외한 경우에는, 동일한 화강암을 대상으로 실험을 수행하여 영향인자에 따른 결과 비교분석이 가능하도록 하였다.

수압은 워터젯의 토출압력을 의미하며 사용된 펌프장비의 경우 최고 280 MPa까지 생성이 가능하지만 안정적인 사용을 위해 250 MPa를 최고압력으로 설정하였다. 수압의 영향을 확인하기 위해 140, 200, 그리고 250 MPa로 수압을 증가시키며 실험을 수행하였다. 그리고 노출시간은 노즐을 고정시킨 상태에서 목표로 하는 암석의 표면에 워터젯이 연속적으로 가해지는 시간으로 정의되며 10, 20, 30, 40초로 수행하였다. 마지막으로 이격거리는 포커싱 노즐 끝에서의 암석표면까지의 거리로 정의하고 현장 적용성 검증을 위해 상대적으로 큰 이격거리인 10, 20, 30, 40, 50 cm로 실험을 수행하였다. 암석시편에 대한 연마재 워터젯의 성능 평가지표는 제거깊이, 제거폭, 그리고 제거부피로 설정하였다. 제거깊이와 제거폭은 자를 이용하여 정확하게 측정하였고, 제거부피의 경우 제거된 공간에 물을 주입하여 제거된 양을 측정하였다.

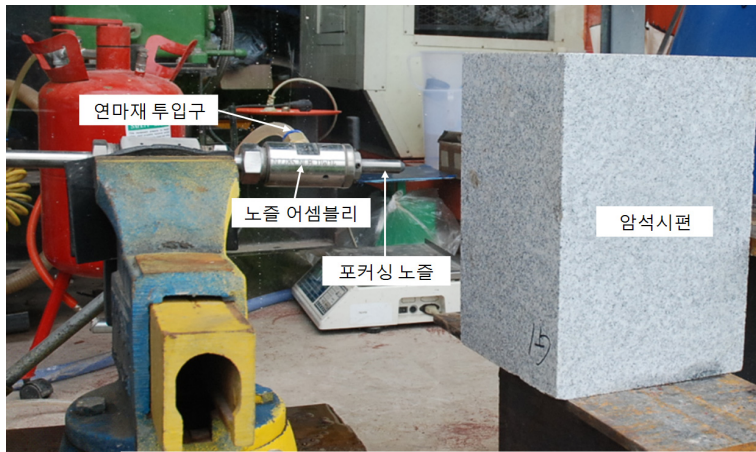
### 2.1 워터젯 시스템 구성

연마재 워터젯 시스템은 고압펌프, 연마재 탱크, 물 탱크, 그리고 노즐 어셈블리로 구성된다(그림 1). 기본적으로 물탱크에서 고압펌프로 물을 공급하고 고압펌프에서 고압수를 생성한다. 생성된 고압수는 파이프를 따라 노즐 어셈블리로 이동된다. 노즐 어셈블리에서 연마재가 투입되어 연마재와 물이

혼합된 슬러리 형태가 형성되고, 마지막으로 포커싱 노즐을 통해 대상물질을 정확하게 타격하게 된다(그림 1(b)). 실험에 사용된 펌프는 디젤 플런저 타입으로 고압에서 고유량 생성이 가능하다. NLB사에서 제작된 것으로 최대압력 및 유량은 표 1과 같다. 사용된 포커싱 노즐은 직경 2.29 mm으로 초경으로 제작되었다. 노즐헤드 내부의 오리피스는 사파이어로 코팅된 직경 0.71 mm인 것을 사용하여 토출압력 250 MPa에서 토출유량이 분당 12 리터가 생성되도록 하였다.



(a) 펌프부



(b) 노즐부

그림 1. 연마재 워터젯 시스템의 구성

표 1. 펌프 성능

펌프 종류	동력(HP)	최대 압력(MPa)	최대 유량(l/min)
Plunger type	240	275	31

## 2.2 시편과 연마재의 준비

### 2.2.1 암석시료

수압, 노출시간, 그리고 이격거리에 따른 영향을 비교하기 위해서 동일한 물성의 화강암 시편이 요구된다. 사용된 화강암 시편은 신선한 경암으로 전라북도 익산시 황등면에서 채취한 황등석을 사용하였다. 황등석의 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 2. 화강암시료의 물리적 특성

암석 종류	건조밀도 (kN/m <sup>3</sup> )	공극률 (%)	흡수률 (%)	일축압축강도 (MPa)	P파 속도 (m/s)
화강암(황등석)	25.68	0.7	0.27	196.4	3394

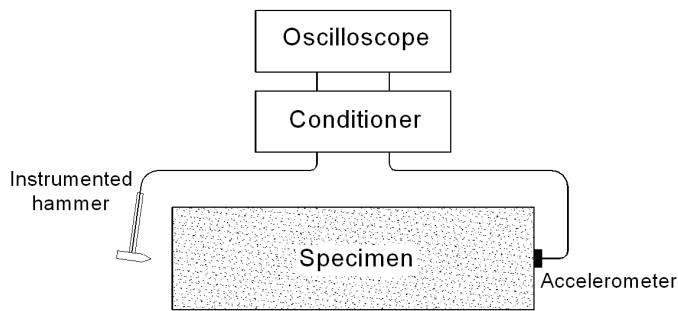


그림 2. P파 속도측정을 위한 구성도(Cha and Cho, 2007)

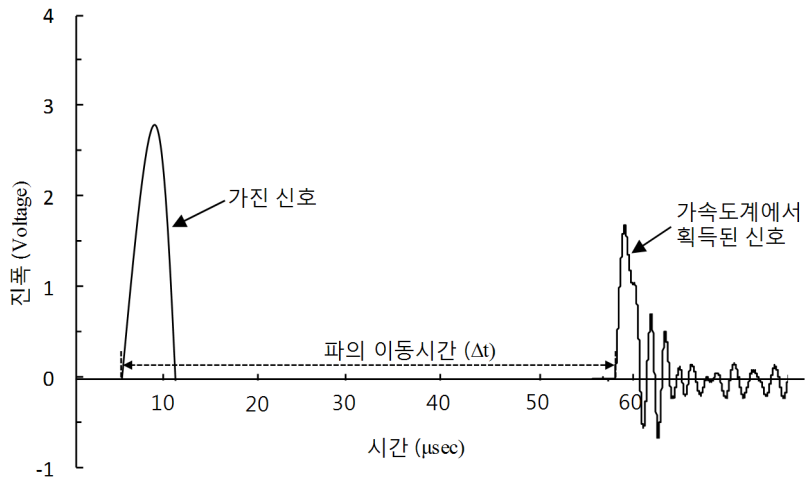


그림 3. 신호의 획득과 P파 이동시간 산정의 예

암석의 물리적 특성에 따라 워터젯의 제거효율은 달라진다. 암석의 물성이 강할수록 연마재 워터젯의 효율은 감소한다. 일반적으로 암석의 단단한 정도에 관련된 물성은 강도, 강성, 그리고 경도로 대표된다. P파 속도는 강성과 밀접한 상관관계가 있다(Cha and Cho, 2007). 본 연구에서는 워터젯 실험 실시 전에 P파 속도를 획득하여 암석 물성과 워터젯 효율성과의 상관관계를 분석하였다. 굴착현장에서 풍화된 정도에 따라 암석 10종을 확보하여 P파 속도를 획득하였다. P파 속도측정을 위한 장비는 가속도계(accelerometer, PCB352C22), 가진해머(instrumented hammer, PCB086C01), 오실로스코프(oscilloscope, Agilent DSO-X3014A), 그리고 컨디셔너(conditioner, PCB 482A16)로 구성된다(그림 2 참조). P파 속도는 암석시편의 한쪽에서 가진을 하고 반대쪽에서 가속도계를 이용하여 신호를 획득한 후 그 시간차와 P파의 이동거리를 이용하여 결정된다(그림 3 참조). P파 속도는 식 (1)에 의해 획득된다.

$$V_p = \frac{L}{\Delta t} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1)$$

여기서,  $V_p$ 는 P파 속도,  $L$ 은 가진 위치에서 가속도계의 설치 위치까지의 거리,  $\Delta t$ 는 가진 후 가속도계에서 최초 신호가 획득 될 때의 시간,  $M$ 은 변위가 허용되지 않는 상태에서의 강성 (constraint modulus), 그리고  $\rho$ 는 밀도(mass density)로 정의 된다.

## 2.2.2 연마재

연마재의 입자크기에 따라 워터젯의 제거 효율성이 달라진다. 연마재는 경도가 강해야 하고 입자는 노즐을 통과할 만큼 작아야 한다. 일반적으로 석류석(garnet)은 경도가 강하며 연마재로서 가장 경제적인 재료이기 때문에 널리 사용된다(선우춘 등, 1996). 워터젯 목적에 따른 연마재(석류석)의 크기(mesh)는 다음과 같다. 1) 120 mesh: 부드러운 표면이 요구될 때 사용, 2) 80 mesh: 대부분의 범용 작업에 사용, 3) 50 mesh: 절삭품질을 고려하지 않고 80 mesh보다 빠른 절삭이 필요시 사용, 4) 20-40 mesh: 정밀도가 낮고 두꺼운 소재의 빠른 절삭에 사용된다.

현장 암반굴착 적용에 있어서 정밀한 절삭보다는 두껍고 단단한 암석을 빨리 굴착하는 것에 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 30-40 mesh의 입경을 가지는 석류석을 선택하였다(그림 4). 연마재는 약 47 g/s로 일정한 투입량을 유지하며 실험을 수행하였다. 사용된 연마재의 물리적 특성은 표 3과 같다.

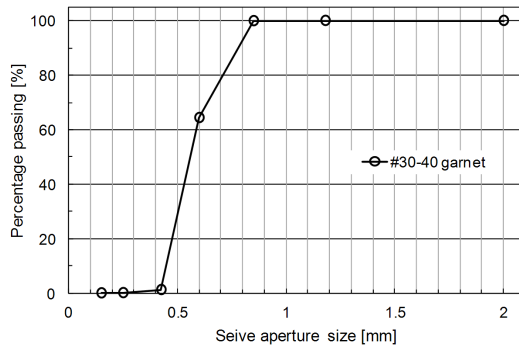


그림 4. 연마재 입도분포곡선

표 3. 연마재의 물리적 특성

연마재 종류	입자 사진	조성	모스 경도	비중	평균입자 크기(mm)
석류석(garnet)		$Fe_2O_3Al_2(SiO_4)_3$	7.5 ~ 8.5	3.9 ~ 4.1	0.55

### 3. 실험 결과 및 분석

그림 5는 노즐이 고정되어 있는 상태에서 연마재 워터젯 실험을 한 전형적인 결과이다. 연마재 워터젯 실험결과, 암석내부에 삼각뿔 형태의 제거형상이 관찰되었다. 이것은 워터젯의 중심부분에 가장 많은 에너지가 집중되어 있고 젯의 외각으로 갈수록 에너지가 많이 분산되는 것을 보여준다. 이격거리에 의한 젯의 분산형상과 그에 따른 제거형상은 그림 6와 같다.

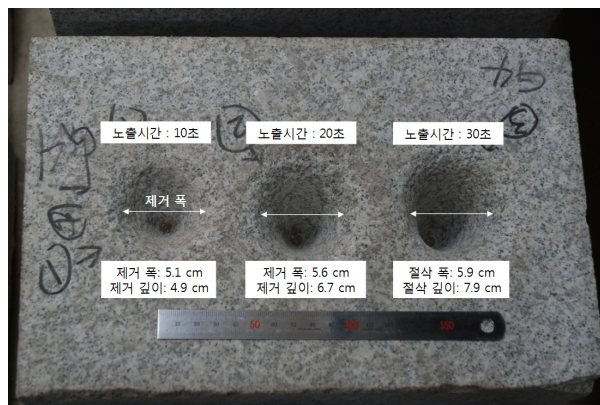


그림 5. 연마재 워터젯을 이용한 암석굴착 결과: 노출시간에 따른 제거형상 변화 (수압: 250 MPa, 초기이격거리 30 cm, 연마재 투입량: 47 g/s)

www.kci.go.kr

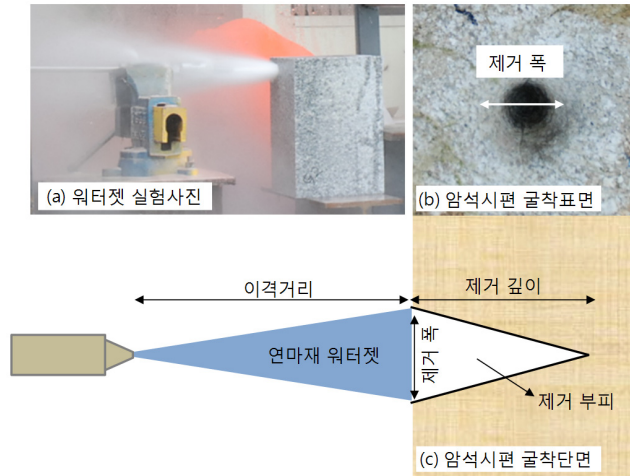


그림 6. 연마재 워터젯에 의한 암석굴착과 측정인자 정의

### 3.1 수압(water pressure)에 따른 영향

수압이 증가하면 연마재 입자의 가속이 증가하기 때문에 연마재 워터젯의 에너지가 증가한다. 높은 수준의 워터젯 에너지는 높은 암석제거율을 보인다. 그림 7는 초기이격거리가 30 cm일 때의 수압과 제거 깊이를 보여준다. 동일한 이격거리에서 수압이 증가하면 제거 깊이도 증가하는 것으로 관찰되었다. 압력 250 MPa에서 40초 동안 워터젯을 가하였을 때, 한번에 최고 12 cm까지 제거 깊이가 형성됨을 확인 할 수 있었다. 그러나 암석표면에 생성된 제거 폭의 경우 수압의 크기와 상관없이 약 5 cm 정도로 일정하였다(그림 8). 이와 같은 결과는 수압 크기에 따른 분사되는 젯의 직경이 비교적 비슷하다는 것을 간접적으로 보여준다. 수압이 증가함에 따라 폭은 일정하더라도 제거 깊이가 증가하기 때문에 전체적인 제거 부피는 증가하는 것으로 확인되었다(그림 9).

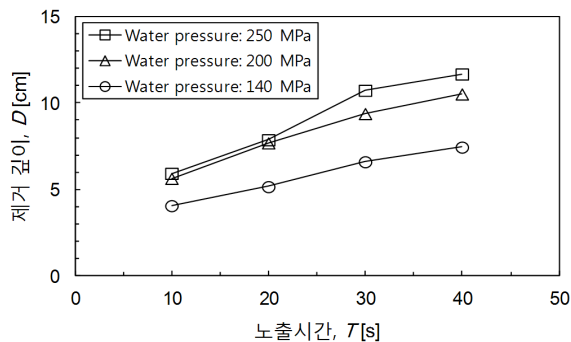


그림 7. 수압과 노출시간에 따른 제거 깊이 변화(초기이격거리: 30 cm, 연마재 투입량: 47 g/s)



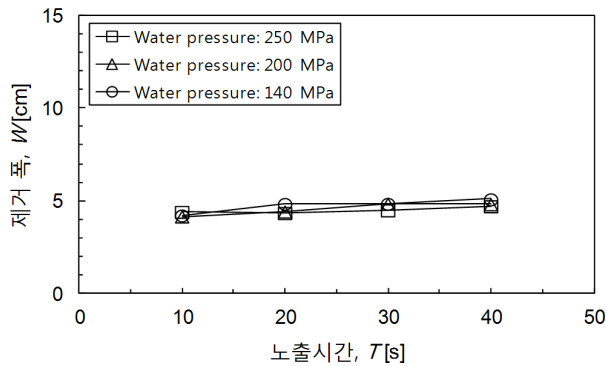


그림 8. 수압과 노출시간에 따른 제거 폭 변화(초기이격거리: 30 cm, 연마재 투입량: 47 g/s)

### 3.2 노출시간(exposure time)에 따른 영향

연마재 워터젯의 노출시간 증가는 대상 암석표면에 가해지는 에너지가 누적됨을 의미한다. 그러므로 노출시간이 증가하면 암석제거 양이 증가한다. 그림 7는 노출시간의 증가에 따라 제거 깊이가 증가함을 보여준다. 그러나 제거 폭의 경우 노출시간의 증가에 따라 미세하게 증가하는 경향을 보이긴 하나 제거 폭에 큰 영향을 미치지 못하는 수준이다.

제거 부피의 경우, 노출시간이 증가함에 따라 제거된 부피양도 증가하였다. 워터젯 압력 250 MPa에서 40초 동안 워터젯을 가했을 경우, 약  $50 \text{ cm}^3$ 의 암석 부피가 제거 되었다(그림 9). 그러나 노출시간이 증가함에 따라 제거되는 효율성은 낮아지는 것으로 분석되었다. 그림 10은 노출시간에 따른 부피 제거율( $L_v$ ) 개념을 도입하여 제거부피에 대한 효율성을 분석한 결과이다. 여기서 부피 제거율은 제거된 부피에서 노출시간을 나눈값으로 워터젯의 단위시간(초)당 제거되는 양을 의미한다. 노출시간에 따른 부피제거율은 최소사승법에 의해 지수함수 관계에서 최적의 됨을 확인되었다.

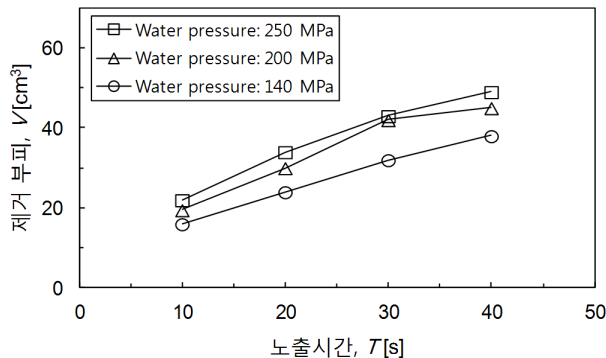


그림 9. 수압과 노출시간에 따른 제거 부피 변화(초기이격거리: 30 cm, 연마재 투입량: 47 g/s)

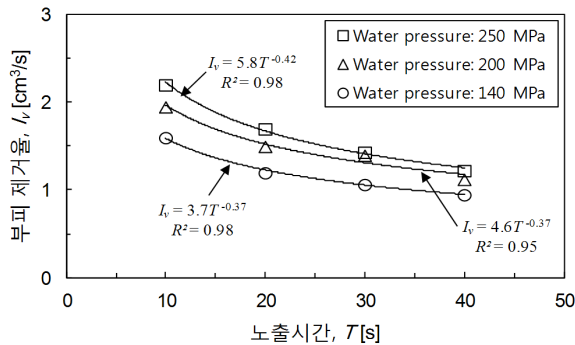


그림 10. 노출시간에 따른 부피 제거율 변화(초기이격거리: 30 cm, 연마재 투입량: 47 g/s)

최소자승법에 의해 획득된 지수함수의 상수와 지수값은 그림 10과 같다. 비록 한정적인 실험결과이지만, 지수함수의 상수는 수압이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 지수는 수압에 상관없이 약 -0.4를 가지는 것으로 분석되었다.

워터젯 수압 250 MPa의 조건에서 부피 제거율을 분석하면, 본 실험에서 사용된 경암 화강암의 경우 노출시간이 10초일 때 약 2.2 cm<sup>3</sup>/s의 부피제거율을 보였다. 반면에 노출시간 40초의 경우 부피제거율은 1.2 cm<sup>3</sup>/s로 확인되었다. 이것은 노출시간 10초일 때와 비교하여, 노출시간 40초의 경우가 비효율적임을 보여준다(부피제거율이 약 55%의 감소). 이러한 결과는, 실제 적용에 있어서 짧은 시간에 여러 번 굴착하는 것이 보다 유리할 수 있다는 것을 보여준다.

### 3.3 이격거리(standoff distance)에 따른 영향

이격거리가 커짐에 따라 분사되는 젯의 직경은 커진다. 젯의 분사직경이 크면 젯 에너지의 산란 정도가 커진다. 그림 11(a)는 이격거리의 증가에 따라 제거 깊이가 일정하게 유지되다가 감소하는 결과이다. 수압 250 MPa, 유량 12 l/min, 연마재 투입량 47 g/s, 그리고 노출시간 10초의 워터젯 변수조건에서, 제거깊이가 유지될 때까지의 이격거리는 약 30 cm으로 확인되었다. 이러한 결과는 사용된 워터젯 시스템이 이격거리 30 cm내에서 워터젯 에너지가 충분히 집중(focusing)되고 있다는 것을 간접적으로 보여준다. 그러나 30 cm이상의 이격거리에서는 분사되는 젯의 직경이 커지기 때문에 제거 깊이가 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 분사에 의해 젯의 중심에서 발생하는 에너지가 흐트러져 감소하기 때문으로 해석된다. 반면에, 이격거리의 증가에 따른 젯의 분사 직경 증가로 인해 제거 폭은 2.2 cm(초기이격거리 10 cm 일 때)에서 5.9 cm(초기이격거리 50 cm 일 때)로 증가하였다(그림 11(b)). 제거 부피 역시 이격거리가 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다(그림 11(c)). 본 연구의 실험변수 조건에서는, 이격거리 50 cm에서 제거 부피가

최대임을 확인하였다. 그러나 이격거리가 무한히 증가함에 따라 제거 부피가 무한히 증가하지는 않는다. 만약 이격거리가 상당히 커지면 대부분의 젯 에너지가 공기저항에 의해 산란되어 제거 부피는 오히려 감소하다가, 최종적으로는 재료제거가 거의 발생하지 않을 것이다. 이러한 현상으로 비추어 볼 때, 제거 부피가 최고가 될 때 최적 이격거리의 검증은 매우 중요하다. 그러나 본 연구에서는 이격거리 50 cm까지 실험이 수행되어 제거 부피가 최고일 때의 이격거리는 확인하지 못하였다. 그러나 현장에서 요구되는 비교적 먼 이격거리인 50 cm의 이격거리에서, 연마제 워터젯을 이용한 암반굴착이 충분히 가능함을 확인할 수 있었다.

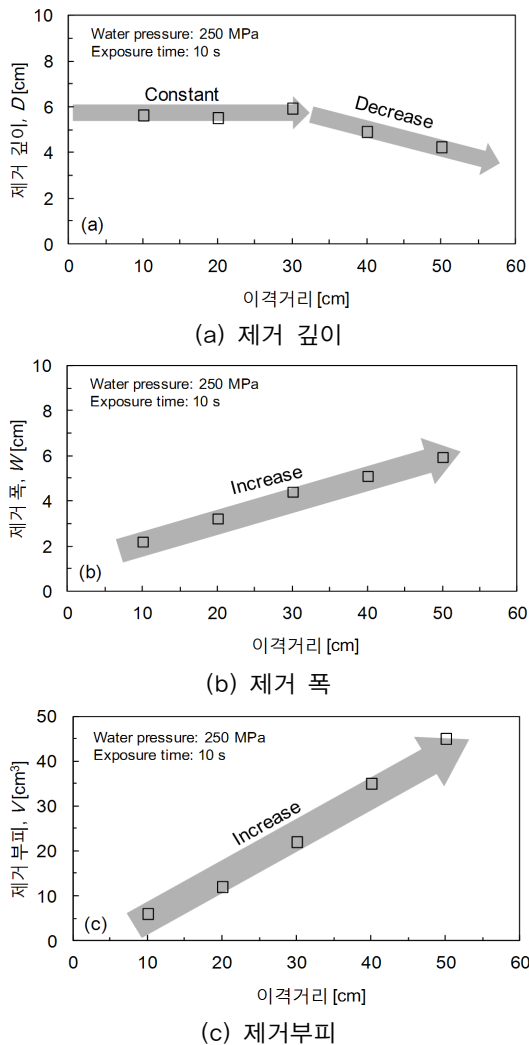
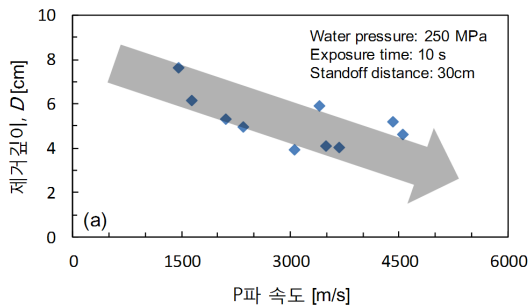


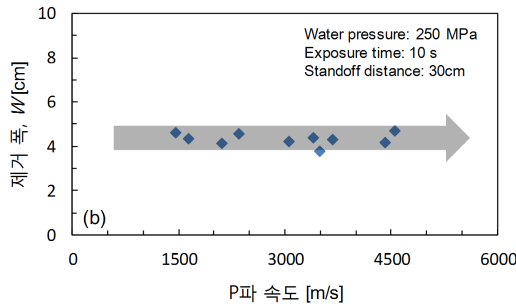
그림 11. 초기이격거리에 따른 암석굴착 결과

### 3.4 암석의 P파 속도에 따른 영향

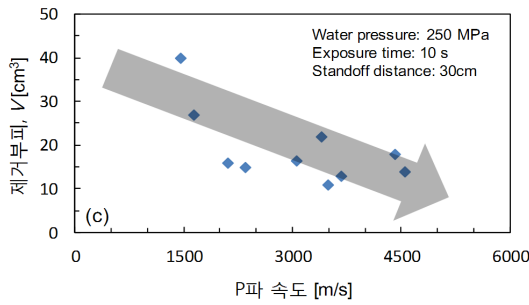
서로 다른 암석시편에서 P파 속도를 측정한 결과, 1450-4545 m/s의 범위를 가지는 것으로 확인되었다. 각각의 암석시편에 대하여 연마재 워터젯을 동일한 조건으로 실험을 실시하여 제거 깊이, 폭, 그리고 부피변화에 관하여 분석하였다. 실험은 수압 250 MPa, 이격거리 30 cm, 노출시간 10초, 그리고 연마재 투입량 47 g/s의 조건에서 실시되었다. 그림 12(a) 는 P파 속도가 증가함에 따라 제거 깊이가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. P파 속도가 약 3배 증가함에 따라 제거 깊이는 약 2배 감소함을 보였다. 그러나 제거 폭의 경우, P파 속도에 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석



(a) 제거 깊이



(b) 제거 폭



(c) 제거부피

그림 12. P파 속도에 따른 암석굴착 결과

www.kci.go.kr

되었다. 제거 폭은 약 4-5 cm사이에서 비교적 일정한 값이 관찰되었다(그림 12(b)). 제거 부피는 P파 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 확인할 수 있었다(그림 12(c)). 제거 부피의 경우, P파 속도가 약 3배 증가함에 따라 약 4배까지 제거 부피가 감소하는 것으로 분석되었다. 이것은 제거 깊이의 변화와 비교하여, 제거 부피의 변화가 P파 속도에 따라 좀더 민감하다는 것을 보여 준다.

#### 4. 결론

본 연구에서 고유량의 연마재 워터젯을 이용하여 수압, 노출시간, 이격거리, 그리고 암석의 P파 속도에 따른 영향을 분석하였다. 실험을 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 워터젯의 수압과 노출시간이 증가함에 따라 암석에서 제거되는 깊이와 부피가 증가한다. 그러나 제거 폭의 경우, 수압과 노출시간의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 수압 250 MPa에서 경암 수준의 화강암에 형성된 제거 깊이와 부피는 노출시간 40초 동안 각각 12 cm와 50 cm<sup>3</sup>로 제거된 것으로 비추어 볼 때, 추후 현장 암반굴착에 있어서 연마재 워터젯은 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.
2. 노출시간의 경우, 노출시간이 늘어남에 따라 단위 시간당 제거되는 부피 제거율( $I_r$ )은 감소하는 것으로 분석되었다. 이것은 대상 목표점에서 오랜 시간동안 워터젯을 작업하는 것은 비효율적이라는 것을 보여준다. 따라서, 짧은 시간에 여러 번 굴착하는 것이 더욱 효율적일 것으로 판단된다.
3. 에너지 손실없이 제거 깊이를 확보하기 위해서는 짧은 이격거리를 유지해야 한다. 반면에, 효율적인 제거 폭이나 제거 부피를 확보하기 위해서는 긴 이격거리가 보다 유리하다. 그러나 한번에 제거되는 정도는 하루 굴진 양과 밀접한 관련이 있기 때문에 너무 먼 이격거리에서의 워터젯 작업은 시공비용과 시간상 불리 할 수 있다. 효율적인 제거 깊이를 위해서는 제거깊이가 유지될 때까지의 이격거리 내에서 작업을 하는 것이 바람직하다. 그리고 효율적인 제거 부피를 위해서는 부피 제거가 최고가 되는 최적 이격거리에서 작업하는 것이 유리하다.
4. 암석시편의 P파 속도는 제거 폭에 영향을 미치지 않았다. 이와 같은 결과는 P파 속도가 작은 암석(약한 암석)이라도 높은 제거 폭을 기대할 수 없음을 의미한다. 반면에, P파 속도가 작은 암석(약한 암석)일수록 측정된 제거 깊이와 부피는 증가하였다. 약한 암석일수록 제거 깊이 보다는 제거 부피의 양이 더 민감하게 변화하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결론은 약한 암석 일수록 부피 제거 측면에서 더욱 효율적이라는 것을 보여준다.

본 연구는 추후 현장상황이 요구하는 비교적 먼 이격거리, 그리고 단단한 암반에서 워터젯 암반 굴착의 적용 가능성을 보여준다. 그러나 실제 현장 암반굴착에서는 노즐이 이동하며 제거된 공간으로 삽입 및 전진하는 연속된 작업을 요구한다. 본 연구에서는 가장 기본적인 성능검증 방법인 노즐이 고정된 상태에서 실험이 수행되어, 현장 워터젯 작업을 모사하여 굴착성능을 검증함에 있어서 한계가 있다. 그러므로, 추후 노즐의 이동과 삽입방법에 따른 굴착성능 및 효율과 관련된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 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. 김정근, 박태동 (2003), “워터젯 보조명판이 장착된 마이크로터널링 머신의 효율성에 관한 연구”, 한국터널공학회 2003년 정기학술발표회 논문집, pp. 242-256.
2. 선우춘, 최병희, 류창하 (1994), “超高壓水에 의한 花崗石切削에 대한 研究”, 터널과 지하공간, 제4권, pp. 92-101.
3. 선우춘, 최병희, 류창하, 권광수 (1996), “Water jet절단에서의 연마재 종류별 성능 비교 시험”, 터널과 지하공간, 제6권, pp. 175-183.
4. 최병희, 양형식 (2001), “워터젯을 이용한 암석의 슬롯절삭에 관한 연구”, 대한화학기술학회지, 제19권, pp. 247-258.
5. 홍의준, 장석부, 송기일, 조계춘 (2010), “발파시 터널 슛크리트의 최대입자속도와 부착상태평가 분석”, 한국터널공학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 247-255.
6. 황학, 이태노 (2002), “터널 심발부의 선균열을 이용한 발파공법의 현장시험에 관한 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제4권, 제4호, pp. 287-300.
7. Cha, M., Cho, G.C. (2007), “Compression wave velocity of cylindrical rock specimens: engineering modulus interpretation”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 7B, pp. 4497-4499.
8. Evans, A.G., Gulden, M.E., Rosenblatt, M. (1978), “Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response régime”, Proc. R. Soc. Lond. Series. A., Vol. 361, pp. 343-365.
9. Gensheng, L., Zhongwei, H., Jilei, H., Riji, C., Wei, X. (2007), “The productivity-enhancing technique of deep penetrating perforation with a high-pressure water jet”, Petroleum Science and Technology,

Vol. 25, pp. 289-297.

10. Kim, J.G., Song, J.J., Han, S.S., Lee, C.I. (2012), "Slotting of concrete and rock using an abrasive suspension waterjet system", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 571-578.
11. Momber, A. (2004), "Wear of rocks by water flow", *Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 51-68.
12. Summers, D.A. (1992), "Hydraulic mining: jet-assisted cutting", *SME Mining Engineering Handbook*, 2nd edition (Ed. H.L. Hartman), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., California, pp. 1918-1929.
13. Summers, D.A. (1995), *Waterjetting Technology*, Chapman & Hall, London.
14. Zeng, J., Kim, T.J. (1996), "An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting", *Wear*, Vol. 193, pp. 207-217.