

# 워터젯을 이용한 암석의 슬롯절삭에 관한 연구

최병희<sup>1)</sup>, 양형식<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원, <sup>2)</sup>전남대학교

## 1. 서론

초기 워터젯 관련기술은 채석산업, 특히 화강석 채석에서 시장성이 있는 것으로 보였다. 이후 기존의 여러 채석법에서 드러난 문제점들을 실제적인 측면에서 고려한 결과 화강석 채석에 워터젯을 적용하려는 노력이 계속되고 있다. 보고에 의하면 워터젯 채석법은 30~50 mm 정도의 절단폭을 보이며, 제트 버너에 비해 소음 수준이 낮고, 1~3 m<sup>2</sup>/h 정도의 비교적 높은 절단율을 제공할 수 있으며, 다이아몬드 와이어를 능가하는 경제적인 잠재력을 지닌 것으로 평가되었다[Bortolussi, 1988; Hawrylewicz, 1988].

본 논문에서는 채석분야 외에도 터널굴착, 재료의 가공, 구조물 해체 등과 같은 워터젯 응용분야에서 재료에 깊은 홈(슬롯)을 절단할 수 있는 실험실용 회전식 슬로터를 제작하여 국내에서 산출되는 몇 종의 암석을 대상으로 워터젯 시스템의 절단효율을 시험하였다. 절단효율의 평가지표로는 절단심도, 각종 운영요소, 절삭율 등을 설정하였다.

## 2. 시험용 워터젯 시스템의 구성

### 2.1 개요

일반적으로 고압수류의 생성단계에서 시작하여 최종단계인 분사에 이르는 전체 과정에서 직접적으로 관계된 모든 장비들과 그 응용에 따라 달라지는 모든 부대장비들을 일컬어 워터젯 시스템이라 한다. 본 시험에서 워터젯 시스템은 크게 고압펌프 시스템과 노즐운동 제어장치로 구분할 수 있다.

### 2.2 고압펌프 시스템

고압펌프 시스템은 증압기(intensifier)를 통해 입력수를 압축하여 고압수류를 만들고 이를 노즐을 통해 분사하는 기능과 관련된 유압펌프, 증압펌프, 분사노즐, 탱크캐치 등을 포함하는 전체시스템을 말한다. 실질적인 절단도구가 되는 분사수류를 만들어 내는 역할은 Fig. 1과 같은 펌프장비가 수행한다. 이 장비는 미국 Flow사의 전신인 ADMAC의 JETPAC 시리즈의 하나로 최대 분사압력 379 MPa, 최대유율 7.5 l/min, 용량 75 kW 급이다.

### 2.3 노즐운동 제어장치

워터젯 시스템의 응용목적에 따라 노즐 어셈블리(nozzle assembly)를 장착하고 필요한 작업을 수행하는 장치를 노즐운동 제어장치라 부른다. 예를 들어, 재료의 곡면가공 응용분야에서는 NC 시스템이 많이 사용되며, 근래에는 로봇팔(robot arm)에 의한 절단연구도 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 암석절단을 목적으로 심도가 깊은 슬롯을 절단하기 위해 제작된 진동식 및 회전식 암석슬로터가 노즐운동 제어장치에 해당된다.

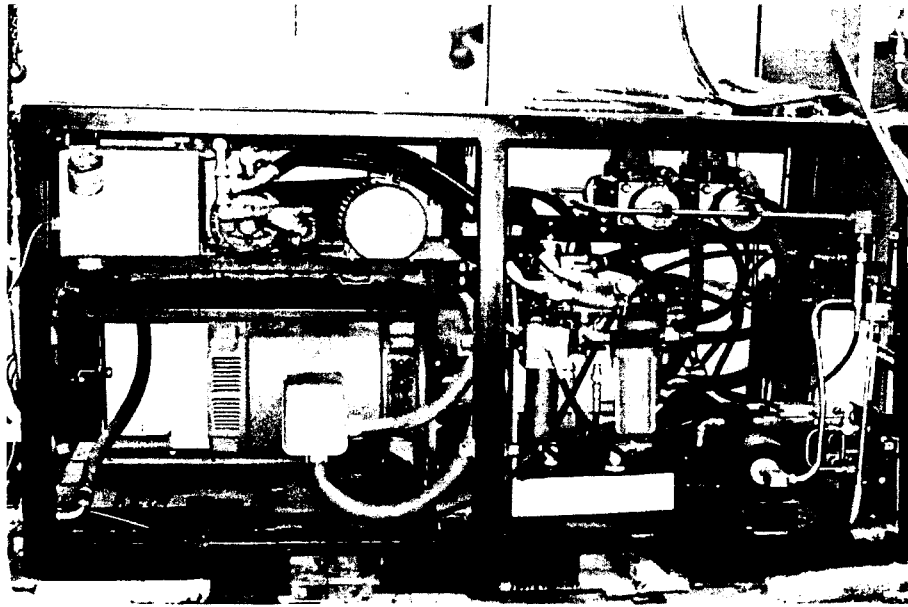


Fig. 1 High pressure pump: JETPAC

### 3. 연마재 투입에 의한 암석절삭 기초실험

#### 3.1 시험재료 및 방법

연마재 투입식 워터젯(Abrasive Water Jet; AWJ) 시스템은 고압수류를 분사시키는 과정에서 연마재의 혼합장치를 두고 연마재를 투입기(hopper)로부터 투입하여 고압수와 연마재를 동시에 대상재료에 분사, 충격하여 재료를 침식시켜 절단하는 시스템으로 정의된다[Hashish, 1984]. AWJ는 투입된 연마재에 의한 충격력의 증가로 물에 의한 워터젯(Pure Water Jet; PWJ)에 비해 그 성능이 크게 향상된다. 본 시험에서는 화강석을 대상으로 PWJ와 AWJ의 절단성능을 비교하였다. 시험에서 적용한 주요 운영요소들은 다음과 같다.

- 노즐구경: 0.355 mm, 0.457 mm
- 노즐튜브: 구경 3.17 mm, 길이 76.2 mm
- 이격거리 및 충격각도: 100~120 mm, 90°
- 토출압력: 140, 175, 210, 245, 280 MPa
- 이송속도: 19.2, 38.0, 56.7, 75.0, 93.3, 111.5 mm/min

시험에 사용된 암석시료는 세립질의 제천석(화강석)이며, 주요 물성은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical and mechanical properties of Jeicheon granite

Mass density	2.65 g/cm <sup>3</sup>
Uniaxial compressive strength	1,100 kg/cm <sup>2</sup>
Brazilian tensile strength	120 kg/cm <sup>2</sup>

연마재로는 석면(garnet), 강옥(aluminum oxide; alumina; corundum), 탄화규소(silicon carbide; carborundum)의 3 종류를 사용하였고, 그 크기와 투입량은 Table 2와 같다.

Table 2 Sizes and mass flow rates of abrasives

Abrasives	Particle sizes	Flow rates
Garnet	70, 80, 120 mesh	192~585 g/min
Aluminum oxide	36, 80, 150 mesh	151~387 g/min
Silicon carbide	36, 80, 150 mesh	180~321 g/min

### 3.2 시험결과 및 고찰

AWJ 시스템에 의해 절단된 전형적인 암석시료의 모습을 Fig. 2에 보였다.

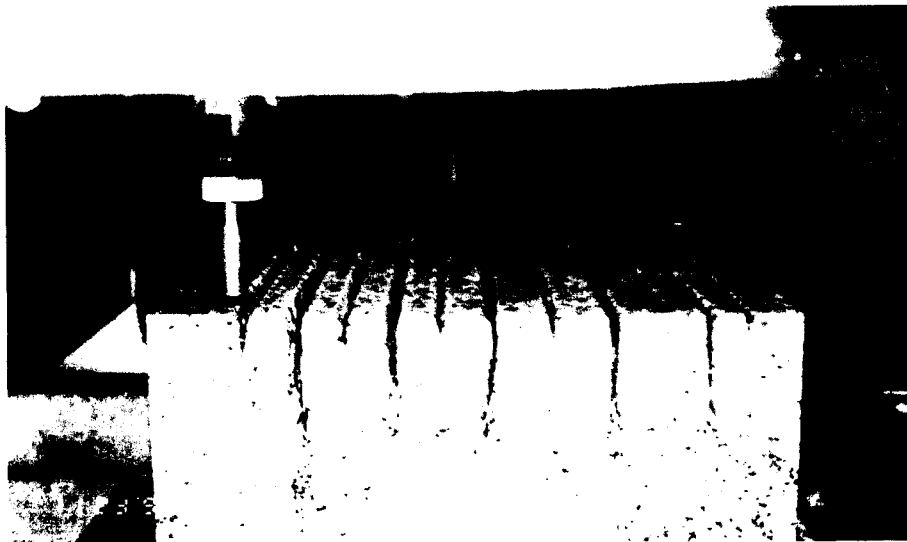


Fig. 2 Typical rock specimen after AWJ cutting

#### 3.2.1 연마재의 영향

절단심도는 연마재의 입자크기에는 큰 영향을 받지 않으며 연마재 투입량에 보다 의존적이다. 연마재 투입량이 늘어날수록 절단심도는 거의 선형적인 증가양상을 보인다(Fig. 3). 하지만 연마재 투입량이 일정 수준을 넘어서게 되면 연마재 상호간의 충돌로 절단심도는 오히려 감소될 수도 있다. AWJ는 투입된 연마재로 인한 충격력의 증가로 PWJ에 비해 절단심도가 3~5배 이상으로 크게 증가하였다(Fig. 4).

#### 3.2.2 토출압력 및 이송속도의 효과

AWJ 절단에서도 일반적인 PWJ 절단의 경우와 마찬가지로 고압수류의 토출압력이 증가하면 절단심도는 거의 선형적으로 증가하는 양상을 보인다(Fig. 5). 이송속도가 증가하면 절단심도는 감소한다(Fig. 6).

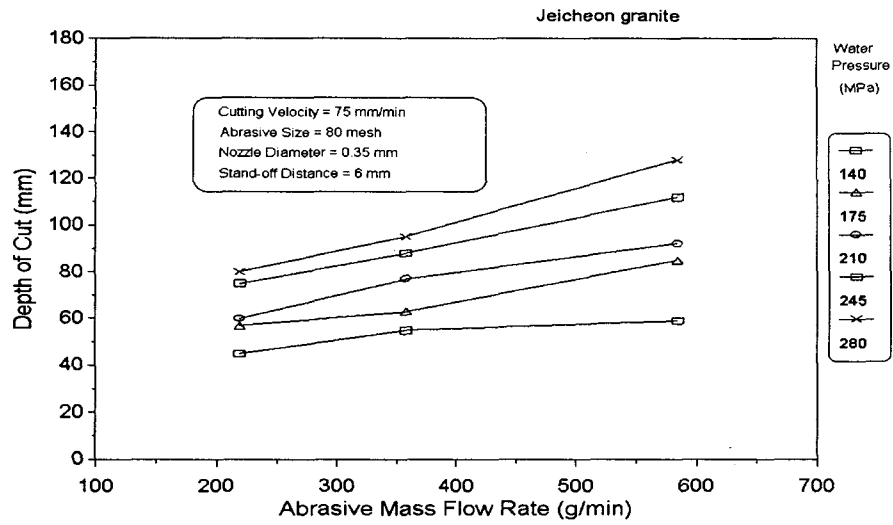


Fig. 3 Effect of abrasive mass flow rate

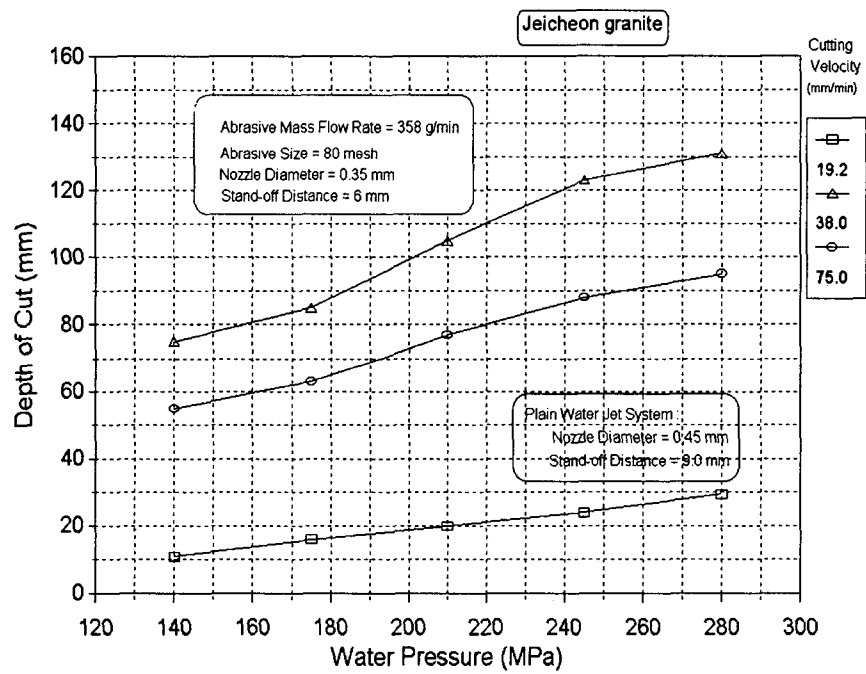


Fig. 4 Comparison of cutting effects between AWJ and PWJ

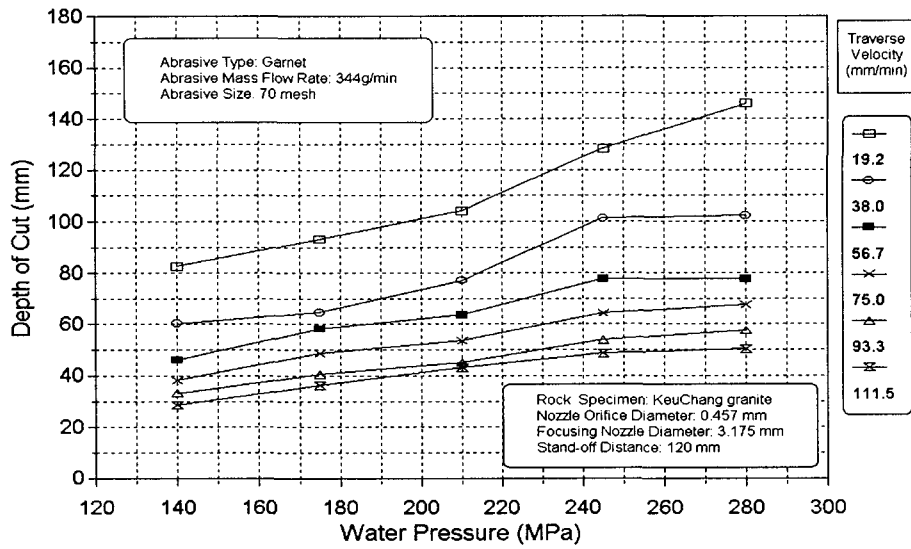


Fig. 5 Effect of jet pressure in AWJ system

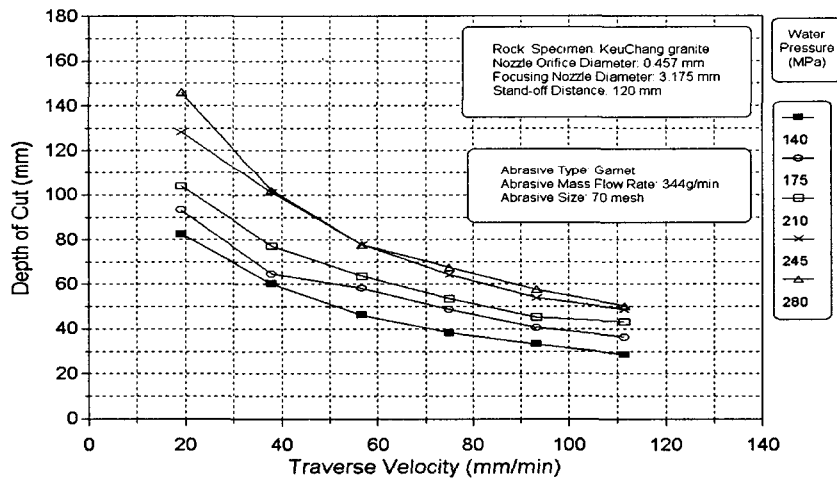


Fig. 6 Effect of traverse velocity in AWJ system

### 3.2.3 연마재의 생산성(productivity)

연마재의 생산성이란 단위 중량의 연마재로 절단할 수 있는 대상시료의 면적으로 정의되며, 간단히 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{V \times H}{F}$$

식에서, P = 연마재의 생산성 [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ], V = 이송속도 [ $\text{cm}/\text{min}$ ], H = 절단심도 [ $\text{cm}$ ], F = 연마재 투입량 [ $\text{g}/\text{min}$ ] 이다. 시험에서 나타난 연마재의 최대생산성은  $0.21 \sim 0.24 \text{ cm}^2/\text{g}$  으로 나타났다.

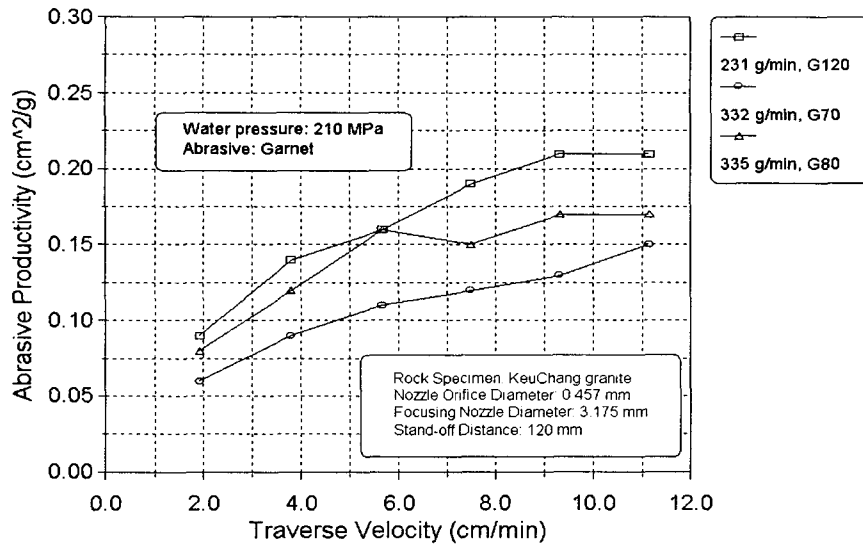


Fig. 7 Productivity of abrasive: Garnet

#### 4. 진동식 슬로터에 의한 슬롯절삭 기초시험

워터젯 시스템으로 암석에 깊은 심도의 슬롯을 절단하기 위하여 비트의 진동운동 메카니즘을 적용한 실험실용 슬로터를 제작하여 각종 운영요소들이 슬롯절단에 미치는 영향을 고찰하였다. 시험에서 고정된 요소들은 노즐구경 0.457 mm, 스템의 길이 750 mm, 이격거리 25 mm 등이었으며, 고압수류의 압력범위는 140~280 MPa, 이송속도는 50~110 mm/sec로 비교적 빠른 속도범위를 사용하였고, 행정수는 10회 및 20회로 하였다. 암석시료는 화강석인 거창석을 300x300x300 mm로 성형하여 사용하였다 (Table 3).

Table 3 Physical and mechanical properties of Geuchang granite

Mass density	2.65 $\text{g}/\text{cm}^3$
Uniaxial compressive strength	1,240 $\text{kg}/\text{cm}^2$
Brazilian tensile strength	120 $\text{kg}/\text{cm}^2$
Porosity	0.28 %

##### 4.1 진동식 슬로터

진동식 슬로터에 의한 노즐비트의 진동운동을 Fig. 8에 보였으며, 비트의 진동방향, 이송방향, 진동각(a), 분사각(b), 이격거리(s) 및 진폭(A)을 확인할 수 있다.

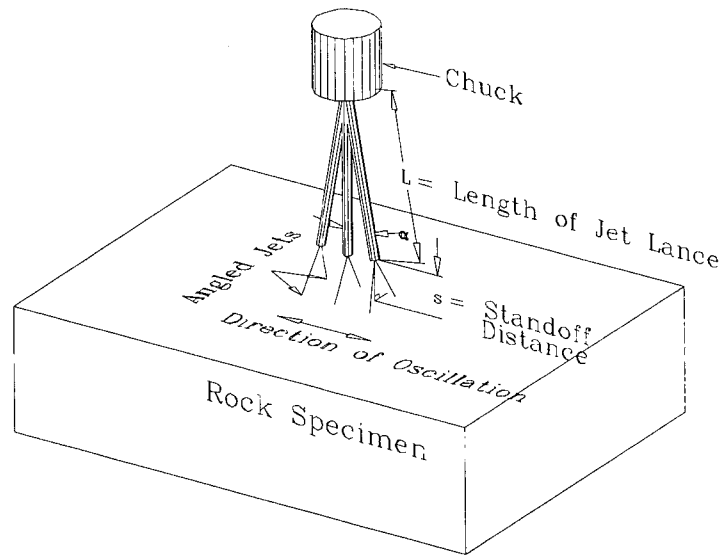


Fig. 8 Vibrational motion of nozzle

#### 4.2 시험결과 및 문제점

제작된 슬로터에 의해 절단된 암석시료에서는 생성된 모든 슬롯들이 바닥이 뾰족한 형상으로 나타났다(Fig. 9). 이는 진폭의 양단에서의 충격각도가 변화되면서 이격거리가 상대적으로 증가한데 기인된 것으로 보인다. 또 Fig. 10 및 11에서 나타난 바와 같이 진동식 슬로터는 넓은 폭의 슬롯형성은 가능하나 일정 심도 이상으로는 노즐비트의 진입이 불가능한 한계를 보였다.

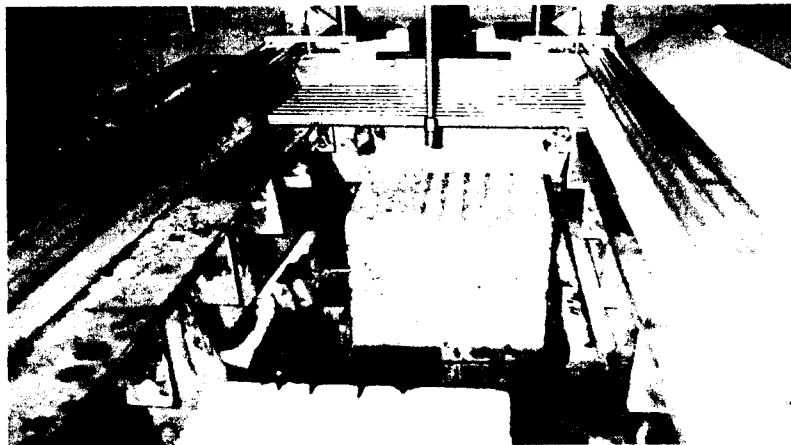


Fig. 9 Typical kerfs cut by vibrating nozzle

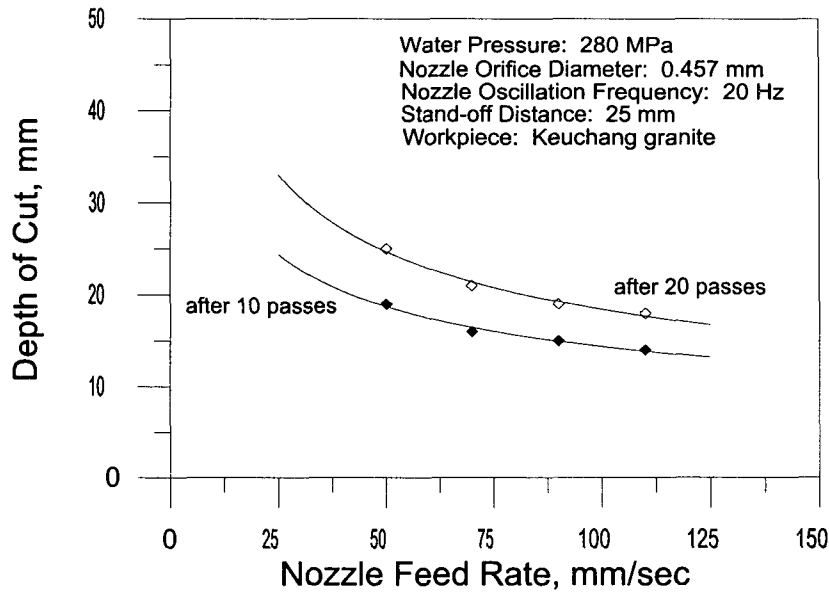


Fig. 10 Effect of nozzle feed rate

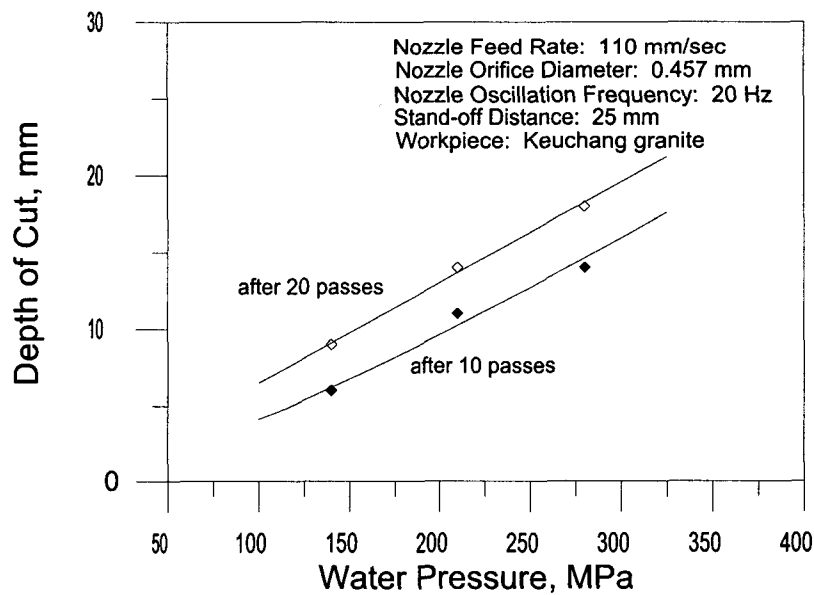


Fig. 11 Effect of jet pressure

## 5. 회전식 슬로터에 의한 고심도 슬롯절삭시험

### 5.1 회전식 슬로터

회전식 슬로터는 노즐비트가 분사수의 중심선을 축으로 회전하도록 설계되었으며, 이송속도는 6.0 cm/sec, 비트의 회전수는 최대 2,160 RPM이다. 장착된 스템 및 비트의 외경은 14.2 mm이다. 노즐은 2~3개로 하되 적절한 분사각도를 부여하였다. 또 운송관과 스템의 연결부에는 미국 Flow사의 고압회전용 스위벨(swivel)을 장착하였다. 고압용 스위벨에는 필연적으로 누수문제가 따르나[Reichman, 1978], 부품성능이 개선되어 내부에 장착되는 seal의 수명이 크게 향상되었다. 회전식 슬로터에 의한 노즐비트의 회전운동을 Fig. 12에 보였다.



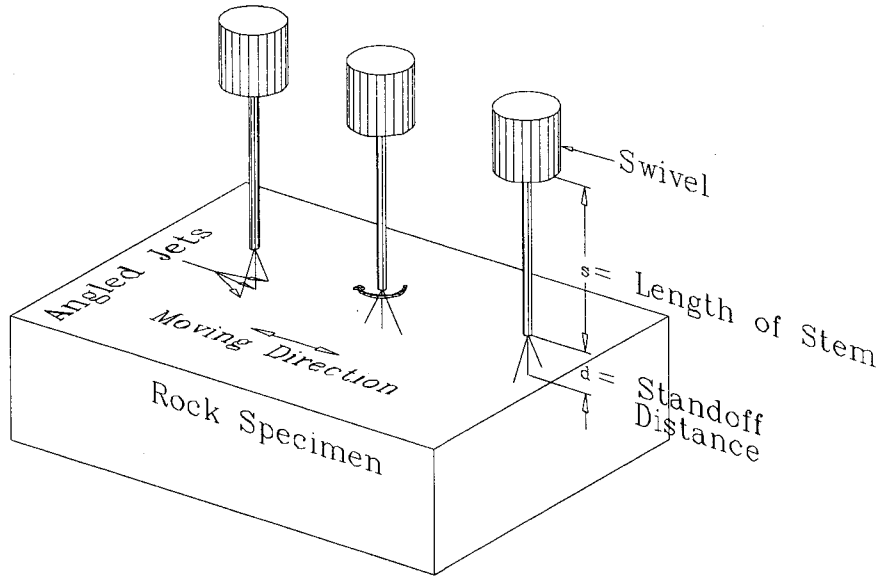


Fig. 12 Rotational motion of nozzle around center axis

Fig. 13은 시험에 사용된 노즐비트의 단면이며, 그림에서 (a)는 분사수 간의 내각이  $20^\circ$ , (b)는  $30^\circ$  인 경우이다. 비트의 중심부에 있는 노즐에 의한 중심수의 충격각도는  $90^\circ$  이다. 본 시험에서는 직경이 0.3~0.7 mm 정도인 사파이어 노즐이 사용되었다.

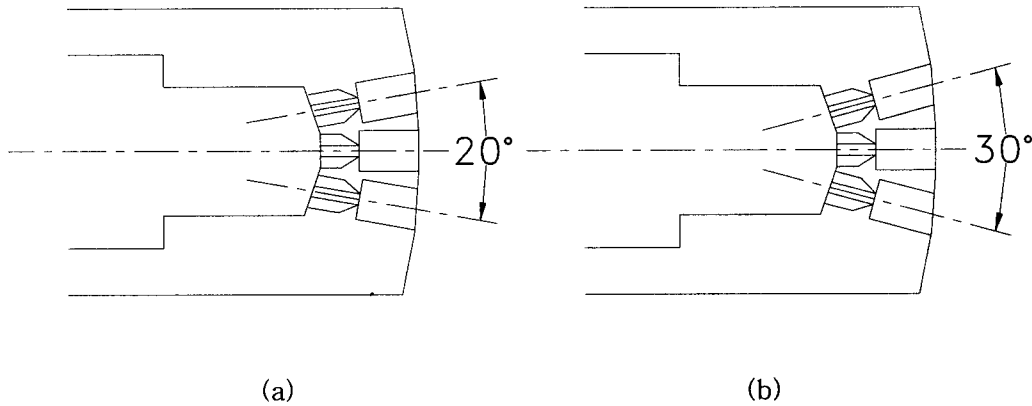


Fig. 13 Nozzle bits with 3 jets

## 5.2 시험재료 및 방법

시험에 사용된 암석시료는 Table 3에 제시한 것과 같은 거창석이며, 주요 시험조건들은 Table 4에 표시하였다.

Table 4 Water jet parameters

Types of pumps		JETPAC	HUSKY S-200
Equipment parameters	maximum pressure	379 MPa	280 MPa
	maximum flow rate	7.5 l/min	24.0 l/min
Jet & operational parameters	pressure range	175~280 MPa	161~189 MPa
	nozzle orifice diameters	0.304~0.330 mm	0.533~0.762 mm
	flow rate	3.0 l/min	6.5 l/min
	stand-off distance	20 mm	20 mm
	rotating speed	1,200 & 1,500 RPM	1,200 RPM

### 5.3 시험결과 및 고찰

회전식 암석슬로터를 사용한 슬롯절삭 시험결과 절단된 암석시료의 일례를 Fig. 14에 보였다. 그림의 슬롯들은 분사압력 245 MPa, 회전수 1,200 RPM, 노즐구경 0.305 mm, 노즐개수 3개(내각 20°)의 조건 하에서 30회의 절단행정을 완료했을 때의 모습이다. 각 슬롯은 (a) 16 mm/sec에서 (e) 3.2 cm/sec까지 0.4 cm/sec 간격의 이송속도에 따라 각기 다른 절단심도를 보여주고 있으며, 슬롯의 절단 폭은 21.7~23.4 mm였다.

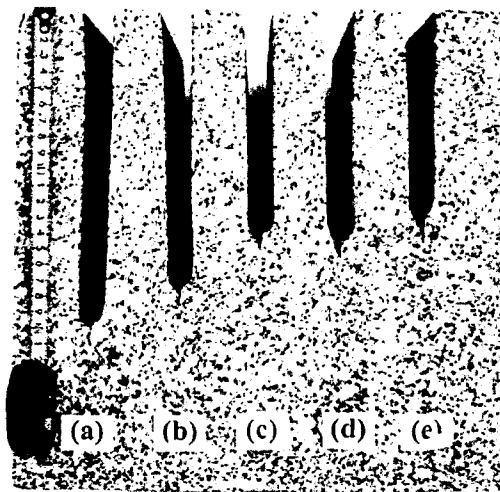


Fig. 14 Typical kerfs

슬롯절삭시험에서도 일반적인 선형절단에서와 마찬가지로 단위 행정당 절단심도는 압력에 따라 선형적으로 증가하였다(Table 5와 6). 또한 분사수의 내각이 20°로 작은 후자의 경우에 절단심도가 더 크게 나타났다.

Table 5 Effect of jet pressure: Impact angles: 90° & 15°

(mm); Nozzle dia.: 0.305 mm; No. of nozzle orifices: 3; ; Rotating speed: 1,200 RPM

Nozzle feed rate	10 passes		20 passes		30 passes	
	210 MPa	245 MPa	210 MPa	245 MPa	210 MPa	245 MPa
1.6 cm/sec	30.25	40.25	54.00	79.90	76.75	119.75
2.0 cm/sec	22.80	37.25	51.50	69.75	73.33	105.75
2.4 cm/sec	23.75	33.25	43.20	64.60	59.00	87.50
2.8 cm/sec	20.06	22.16	33.67	44.25	49.20	68.13
3.2 cm/sec	14.76	-	28.75	-	45.00	-

Table 6 Effect of jet pressure: Impact angles: 90° & 10°

(mm); Nozzle dia.: 0.305 mm; No. of nozzle orifices: 3; ; Rotating speed: 1,200 RPM

Nozzle feed rate	10 passes		20 passes		30 passes	
	210 MPa	245 MPa	210 MPa	245 MPa	210 MPa	245 MPa
1.6 cm/sec	49.65	65.15	96.30	128.93	134.73	195.23
2.0 cm/sec	44.55	57.85	84.40	119.95	124.30	173.80
2.4 cm/sec	44.00	51.15	81.57	99.90	119.70	142.75
2.8 cm/sec	41.65	38.50	78.05	87.25	107.80	145.45
3.2 cm/sec	39.18	58.58	69.55	98.63	104.43	130.50

슬로터의 재료제거율, 즉 절삭율(cutting rate)은 단위시간당 제거되는 재료의 양을 말하며, 본 시험에서는 이송속도와 절삭심도의 곱으로 정의되는 면적절삭율로 정의한다. 시험결과 나타난 슬로터의 절삭율은 약 40~160 mm<sup>2</sup>/sec 정도였다. 한편, 최대유율 24 l/min의 HUSKY S-200 펌프에 의한 시험 결과 JETPAC 펌프에 비해 1.13~3.47 배의 절단심도를 보였다(Fig. 15).

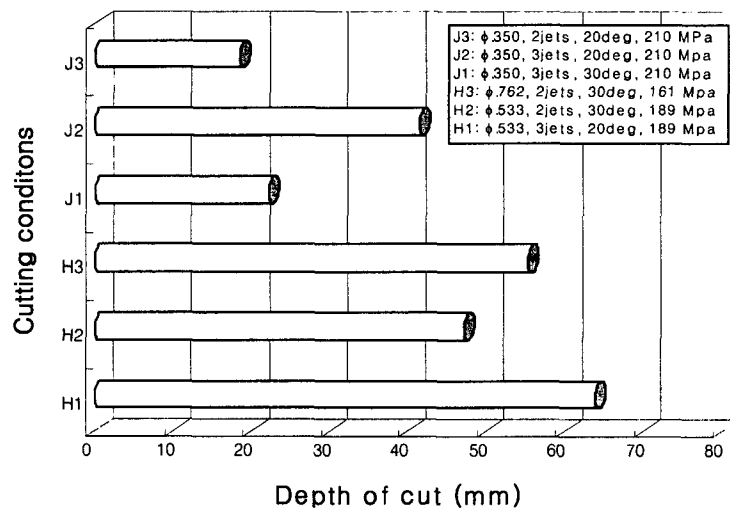


Fig. 15 Comparison of depth of cut: JETPAC vs HUSKY

## 6. 결 론

워터젯 시스템을 이용한 암석절단의 기초시험으로서 순수한 물에 의한 절단, 연마재 투입에 의한 절단, 진동식 암석슬로터에 의한 슬롯절단 시험 등을 수행하고, 이를 토대로 실험실용 회전식 암석슬로터를 제작하여 국내산 화강석을 대상으로 깊은 심도의 슬롯을 절삭하는 시험을 수행하여 워터젯 시스템의 절단효율을 평가하였다. 시험을 통해 얻은 주요 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1) PWJ 시스템에 의한 암석절단 시험에서는 고압수류의 토출압력은 절단심도에 정비례하였고, 노즐 이송속도는 반비례 관계를 보였다.

2) AWJ 절단은 PWJ에 비하여 투입된 연마재로 인한 충격력의 증가로 절단심도가 크게 증가하였는데, 유사한 조건 하에서 300~500% 이상의 절단심도의 증가를 보였다. 연마재의 생산성은 최대 0.21~0.24 cm<sup>2</sup>/g 정도로 나타났다. 시험에 사용된 연마재인 석면, 강옥 및 탄화규소는 비슷한 조건에서 심도차가 최대 10~20 mm 정도로 상호간 절단력의 차이를 거의 드러내지 않았다.

3) 진동식 슬로터를 사용한 시험결과 생성된 모든 슬롯들이 테이퍼 형상을 보였다. 즉, 진동식 슬로터는 넓은 폭의 슬롯의 형성은 가능하나 일정 심도 이상으로의 비트진입이 불가능한 한계를 보였다.

4) 회전식 슬로터는 심도에 관계없이 평행한 절단벽면을 갖는 넓은 폭(22mm)의 슬롯절단이 가능하며 비트(φ14.2mm)가 암반 중으로 충분히 진입될 수 있음을 보여주었다. 절단율은 시험에 사용된 16~32 mm/sec의 이송속도 범위에서는 대략 40~160 mm<sup>2</sup>/sec로 나타났다. 만일 연마재의 직접주입법을 채택한다면 절단율은 3배 이상 증가할 것으로 생각된다.

8) 최대유율 24 l/min의 HUSKY S-200 고압펌프를 사용한 시험에서는 JETPAC 펌프에 비해 큰 구경의 노즐을 사용할 수 있었고, 보다 낮은 압력에서도 절단심도가 1.13~3.47 배까지 증가하는 결과를 보였다.

## 참 고 문 헌

1. Bortolussi, A., Ciccu, R., Manca, P.P., and Massacci, 1988, Improved technology and planning in modern quarries, Mine planning and equipment selection, singhal (ed.), Balkema, Rotterdam, pp 107-119
2. Hashish, M., 1984, "On the modelling of abrasive water jet cutting", Proc. 7th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, BHRA. England, pp. 249-265
3. Hawrylewicz, B.M., Vijay, M.M., Remisz, J., and Paquette, N., 1988, "Design and testing of a rock slotter for mining and quarrying applications", Proc. 9th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 377-386
4. 선우춘 외, 1993, 94, 95, 채석기술 개발 및 가공기술 기초연구, 한국자원연구소, 연구보고서
5. 한공창 외, 1996, 97, 98, 채석 및 석재가공 기술연구, 한국자원연구소, 연구보고서