

Water jet 절단에서의 연마재 종류별 성능 비교 시험

鮮于椿¹⁾ · 崔炳熙²⁾ · 柳昌夏³⁾ · 權光秀⁴⁾

Comparison of cutting performance of an AWJ with several types of abrasives

Choon Sunwoo, Byung-hee Choi, Chang-ha Ryu and Kwang-soo Kwon

ABSTRACT Linear cutting tests on granite were conducted to evaluate the cutting performance of abrasive water jet (AWJ) using several types of abrasives. The abrasives used in the tests were garnet, aluminum oxide, and silicon carbide. And one type of granite which is commercially known as "KeuchangSuk" was used as workpiece throughout the tests. The results from the tests were described in terms of cutting depth and abrasive productivity. Authors tried to confirm the effects of the operational parameters of abrasive mass flow rate, water pressure, and traverse speed of nozzle on cutting depth and presented almost all the data obtained in the tests. Abrasive productivity can be defined as the area of kerf wall cut by unit weight of abrasive and is an important factor to evaluate the cutting ability of abrasive and assess the cost effectiveness of an AWJ system. In the tests the maximum abrasive productivities of garnet, alumina, and silicon carbide were about 0.21, 0.24, and 0.20 cm²/g respectively under similar operational conditions.

1. 서 론

물에 의한 재료의 침식은 자연적 현상으로서 계류 및 강과 대양에 존재한다. 고압수에 의한 재료의 침식은 재료의 가공을 목적으로 인위적인 힘을 가하여 자연적인 현상을 가속시키는 것이다. 1968년 최초의 고압수 분사 시스템이 등장한 이래로 수분사 기술은 성장을 거듭하여 오늘날에는 연속 수분사(continuous water jet), 연마재 적재식 수분사(abrasive-entrained water jet), 캐비테이팅 수분사(cavitating water jet), 펄스식 수분사(pulsed water jet) 기술 등으로 분화, 발전하였다. 기술의 발전에 따라 그 응용 분야도 다양해지고 있으며 대표적으로 재료의 가공분야에서는 암석이나 각종 재료의 절단, 천공, 밀링 등이 있으며, 클리닝 분야에서는 코팅의 제거, 선박과 같은 금속표면의 녹이나 부착물의 제거 등이 있으며, 광산응용 분야에서는 터널 굴착의 보조수단 등으로 이용되기

도 한다.

연마재투입 고압수 절단시스템(abrasive water jet cutting system: AWJ 시스템)은 연마재 적재식 수분사 기술의 하나이며 수분사 기술들 가운데 현재 가장 널리 사용되고 있는 절단기술이다. 이 시스템은 유압을 이용하는 증압펌프를 사용하여 유체(주로 물)를 고속(약 420 MPa)으로 가압한 뒤 저구경의 노즐을 통해 고속(약 800 m/s)으로 분사시키는 방법으로 작동한다. 고속, 고압의 수류는 암석, 금속, 플라스틱, 목재 등의 재료에 shearing, cracking, delamination 등과 같은 손상을 줄 수 있다. 이와 같은 순수한 수분사의 절단 효율을 높이기 위하여 고압수가 분사되는 지점에 연마재의

* 1996년 7월 12일 접수

1) 정회원, 한국자원 연구소, 자원개발연구부, 책임연구원
2) 정회원, 한국자원 연구소, 자원개발연구부, 연구원
3) 정회원, 한국자원 연구소, 자원개발연구부, 선임연구원
4) 정회원, 한국자원 연구소, 자원개발연구부, 책임연구원, 부장

혼합실(mixing chamber)을 두고 적당한 크기의 연마재를 고속 수류에 투입하여 적재시키면 연마재에 의한 충격력의 증가로 분사수의 절단력이 크게 향상된다. 이 경우 물은 주로 연마재 입자들을 가속시키는 매개물로서만 작용하며 실제 재료제거의 역할을 담당하는 것은 연마재 입자들이다.

본 시험에서는 연마재 투입에 의한 수분사 절단시험(선우 춘 외, 1995)의 결과를 토대로 연마재의 종류에 따른 화강석의 절단성능을 평가하기 위하여 몇 종류의 대표적인 연마재를 사용하여 운영 매개변수를 변화시키면서 고압수 분사에 의한 대상 화강석의 절단성능을 평가하였다.

2. AWJ 시스템

AWJ 시스템은 Fig. 1에서와 같이 일반적으로 5개의 부분으로 이루어진다. 즉, 고압펌프, 노즐 어셈블리, 연마재 전송시스템, 노즐운동 제어시스템 및 캐쳐시스템으로 나누어 볼 수 있다.

2.1 고압 펌프 시스템

실질적인 절단 메카니즘이 되는 분사수류를 만들어내는 것은 펌프장비이며 본 시험에서는 ADMAC사의 JETPAC 시스템을 사용하였다. 이 시스템의 핵심적인 구성성분인 증압펌프(선우 춘 외, 1994, Fig. 1참조)로부터 나오는 고압수의 최대 토출압력은 385 MPa이다.

2.2 노즐 어셈블리 및 연마재 전송 시스템

노즐 어셈블리는 고압수와 연마재가 혼합되는 혼합실을 제공하며 노즐 오리피스, tapered sleeve, focusing tube 등으로 이루어진다. 본 시험에서는 미국 Flow Industries 사의 PASER 노즐 어셈블리를 사용하였다. Fig. 2는 노즐 어셈블리 내의 사파이어 노즐 오리피스로부터 분사된 고압수가 투입된 연마재를 가속시키는 과정을 보여주고 있다.

수분사 노즐 오리피스는 통상 합성 사파이어

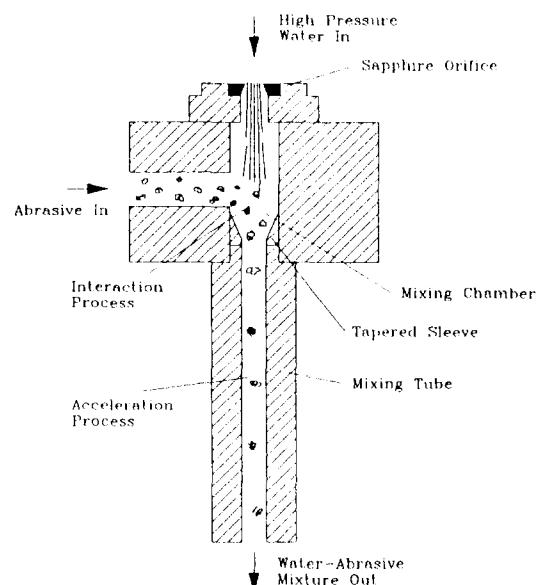


Fig. 2. Mixing process of abrasive and water.

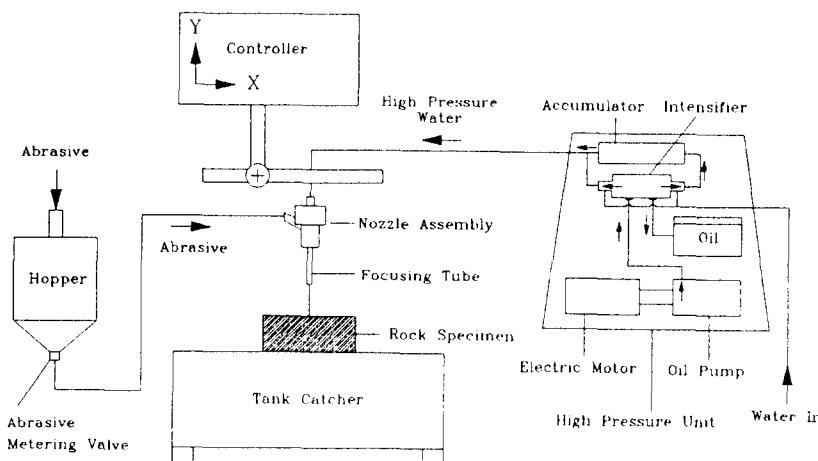


Fig. 1. Scheme of Abrasive Water Jet System.

(synthetic sapphire)로 만들어지며 screw set와 sleeve에 의해 고압수 운송파이프 끝의 텁에 장착된다. 본 시험에서는 직경이 0.457 mm인 사파이어 노즐을 사용하였다. 사파이어 노즐은 비교적 값이 저렴하며 수명은 최대 200시간 정도이다.

노즐 오리피스를 통과한 고압수는 hopper로부터 투입된 연마재와 혼합된 후 tapered sleeve와 focusing tube 노즐을 차례로 지나 대상시료에 분사된다. 따라서 이와 같은 tapered sleeve와 focusing tube는 사파이어 노즐보다 비교적 마모가 심한 편이며 특히 분사수의 중심선이 맞지 않는 경우에는 고속으로 충격되는 연마재에 의해 불과 몇 분 사이에도 심하게 마모된다. 시험에 사용된 tapered sleeve의 내경은 3.30 mm였으며, focusing tube의 내경은 3.175 mm, 길이는 7.62 mm였다. Fig. 3은 약 30~60분 정도 사용한 tapered sleeve와 focusing tube를 보여주고 있다.

연마재 전송시스템은 연마재를 저장하는 호퍼(hopper)로부터 연마재가 고압수에 적재되는 노즐 어셈블리에 이르는 전체 시스템을 말한다. 호퍼 속에 저장된 연마재는 자동에 의한 낙하와 고압수의 분사시에 발생하는 압력차에 의해 노즐 어셈블리로 투입된다.

2.3 노즐운동 제어시스템 및 캐쳐 탱크

시험에 사용된 노즐운동 제어장치는 제어기와 구동 시스템으로 구성되어 있으며 노즐 어셈블리를 장착하고 변속모터를 사용하여 수평방향에서 이동속도를 최대 120 mm/min까지 가변시킬 수 있다. 최대 이동가능 거리는 수평 및 수직방향 공히 700 mm로 설계되어 있다. 현재 노즐운동 제어시스템 부분은 CNC 시스템이나 로봇암 등을 사용하여 각종 재료의 곡면절단 및 정

밀 재단에 많이 이용되고 있다.

제트 캐쳐는 시료를 통과한 분사수와 연마재 및 절단된 시료조각들을 받아내는 역할을 하며 적절한 설계를 한다면 고속 분사수의 분산에 의한 소음(최대 약 105 dB)을 어느 정도 줄이는 역할을 한다.

3. 시험재료 및 시험방법

3.1 화강석

시험에 사용된 암석시료는 화강석인 거창석이며 시료의 크기는 300×300×300 mm로 성형하여 사용하였다. 이 거창석의 역학적인 특성은 다음 표 1과 같다.

3.2 연마재

유리와 같은 취성재료의 절단에는 고운 모래를 연마재로 사용할 수도 있다. 그러나 유리보다 저항이 훨씬 큰 암석을 절단하는 경우에는 모래가 적합하지 않으며 각진 모서리를 가진 고경도의 입자가 필요하다. 물론 이런 연마재는 가격이 비싸므로 이에 상응하는 보다 효율적인 절단성능이 요구된다. AWJ에 있어 절단성능은 연마재의 종류에 따라 직접적으로 연관되지만 연마재 입자의 경도나 날카로움이 좋다고 하더라도 입자들이 집중되어 분사되지 않으면 절단성능이 저하된다. 본 시험에서는 서로 다른 특성을 보이는 3가지 연마재를 사용하였으며 각 연마재들의 물리적인 성질들은 일반적으로 다음 표 2와 같다.

Table 1. physical properties of tested rock

rock type	granite (Keochang-seok)
density (g/cm ³)	2.65
compressive strength (kg/cm ²)	1,240
tensile strength (kg/cm ²)	120
absorption (%)	0.28

Table 2. physical properties of used abrasives

type of abrasives	Garnet	Aluminum Oxide	Silicon Carbide
hardness (Hv, kg/mm ²)	1300	1500	2500
density (g/cm ³)	3.9~4.1	3.96	3.21
particle size (mesh)	70,80,120	36,80,150	36,80,150

* 표기 : G70, G80, G120, A36, A80, A150, S36, S80, S150

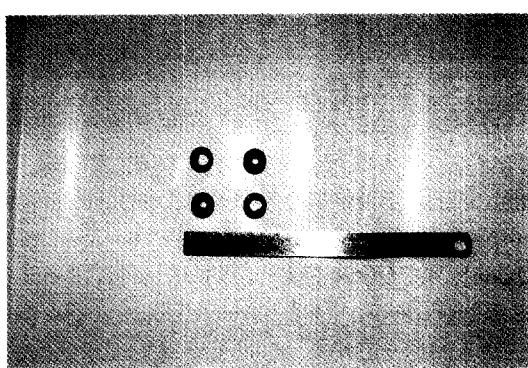


Fig. 3. view of worn tapered sleeve.

3.3 시험방법

본 시험에서는 연마재의 종류에 따른 화강석의 절단 성능을 평가하기 위하여 세 가지 연마재에 대하여 장비의 주요 운영요소들을 변화시키면서 절단심도를 측정하는 방법을 사용하였다. 운영요소란 시료를 절단하는데 있어 임의로 변화시킬 수 있는 운영상의 변수를 의미한다. 여기에는 분사수의 압력, 노즐 오리피스의 직경, 이격거리, 이송속도 등이 있으며 이와 같은 요소들을 절단성능에 영향을 주는 요소라고도 부른다. 또한 절단성능에 대한 평가지표로는 절단심도, 절단폭, 절단체적, 또는 단위 절단길이당 소모된 에너지의 양 등이 있다. 본 시험에서는 이 가운데 절단심도를 절단성능 평가의 지표로 선정하여 절단의 효율성과 연마재의 생 산성을 시험하였다.

연마재 투입량의 측정은 연마재 호퍼에 부착된 매스 실린더와 절단후 남아있는 연마재의 무게를 측정하여 행하였다.

- 시험 전체를 통하여 고정된 요소들은 다음과 같다.
 - a. 노즐 오리피스 직경 : 0.457 mm
 - b. Focusing tube 직경 : 3.175 mm
 - c. 이격거리 : 10 mm (focusing tube와 시료표면 사이의 거리)
- 시험에서 적용한 장비의 운영 요소들은 다음과 같다.
 - a. 분사압력 : 140, 175, 210, 245, 280 MPa
 - b. 이송속도 : 38, 57, 75, 93, 112 mm/min
 - c. 연마재의 종류 및 입자크기 : Garnet 70, 80, 120 mesh
Aluminum Oxide 36, 80, 150 mesh
Silicon Carbide 36, 80, 150 mesh
 - d. 연마재 투입량 : Garnet 192-375 g/min
Aluminum Oxide 151-387 g/min
Silicon Carbide 180-321 g/min

4. 시험결과 및 고찰

4.1 연마재 재질의 영향

연마재 입자의 종류는 AWJ에 의한 암석절단에 있어 가장 중요한 요소들 가운데 하나이다. 즉, 연마재의 종류에 따라 절단능력 및 운영비 등이 달라지기 때문이다. 예를 들어, silicon carbide는 날카로운 형상과 높은 경도 때문에 상당한 절단심도를 얻을 수 있으나 가격이 비싼 편이다. 반면 garnet의 경우는 가격도 저렴하며

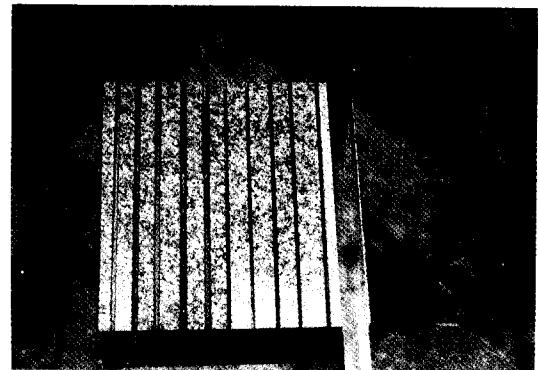


Fig. 4. view of cut slots by AWJ.

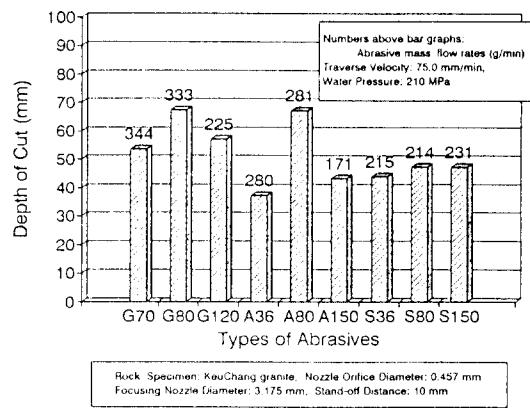


Fig. 5. depth of cut with various abrasives at same experimental condition.

절단능력도 상당히 뛰어나 현재 가장 널리 이용되고 있는 연마재에 속한다. 강하고 날카로운 연마재는 tapered sleeve와 focusing 노즐을 빨리 마모시켜 분사수의 직경이 커지고 모양도 뒤틀리게 된다. 따라서 AWJ용 연마재는 높은 절단능력을 지니면서 저렴하고 아울러 노즐의 마모도를 감소시키는 능력을 가져야 이상적이라 할 수 있다. Fig. 4은 시험에 사용된 거창석의 절단된 모습을 보여준다.

Fig. 5는 노즐 이송속도 75 mm/min과 분사수압 210 MPa 수준에서 각 연마재에 의한 절단심도를 보여주고 있다. Garnet은 연마재 투입량이 225-333 g/min 일 때 50-70 mm 정도의 절단심도를 보인다. Aluminum Oxide는 투입량 171-281 g/min일 때 약 35-70 mm 정도의 절단심도를 보인다. Silicon carbide의 경우 투입량 214-231 g/min에서 40-50 mm 정도의 절단심도를 보이고 있다. 연마재별 최대 절단심도는 80 mesh 수준

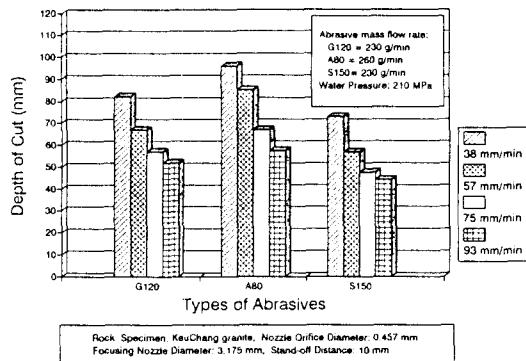


Fig. 6. Depth of cut vs. type of abrasives with traverse speed as parameter.

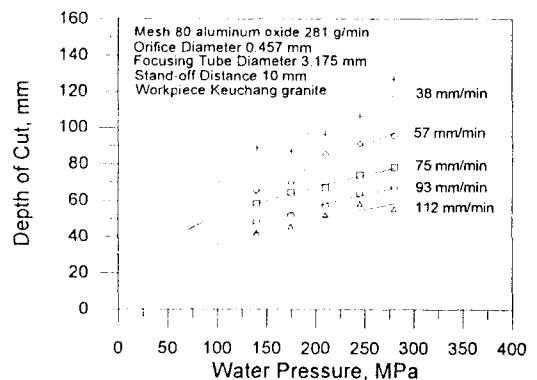


Fig. 8. Driving pressure vs. depth of cut with traverse speed as parameter (A80).

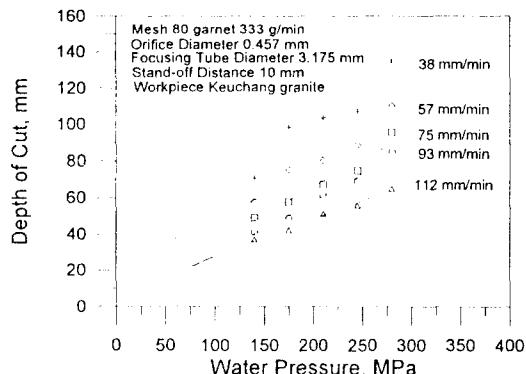


Fig. 7. Driving pressure vs. depth of cut with traverse speed as parameter (G80).

에서 나타나고 있으나 전체적으로 연마재의 입자크기는 절단심도에 큰 영향을 미치지 않으며 연마재 투입량에 보다 의존적임을 알 수 있다.

Fig. 6은 연마재 투입량이 비슷한 경우 연마재별 절단심도를 이송속도에 따라 보여주고 있다. 연마재 투입량 230 g/min에서 garnet은 50-80 mm 정도의 절단심도를 보이며 동일한 투입량의 silicon carbide는 40-70 mm 정도의 절단심도를 보인다. 연마재 투입량이 260 g/min의 aluminum oxide는 55-95 mm 정도의 보다 큰 절단심도를 보이고 있다. Fig. 5와 6으로부터 절단심도는 silicon carbide, garnet, alumina 순으로 증가됨을 알 수 있다.

4.2 토출압력의 효과

Fig. 7, 8, 9는 각각 garnet, aluminum oxide 및 silicon carbide를 연마재로 사용했을 때 이송속도 38-

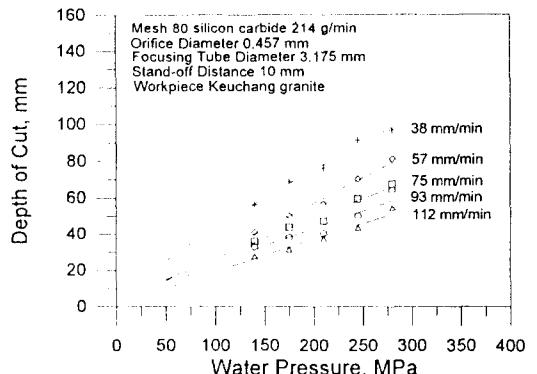


Fig. 9. Driving pressure vs. depth of cut with traverse speed as parameter (S80).

112 mm/min의 수준에서 고압수의 토출압력이 절단심도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 절단심도는 이송속도, 연마재 투입량, 입자크기 등과는 별도로 토출압력이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있다. Fig. 7의 garnet의 경우 토출압력이 140 MPa로부터 280 MPa로 2배 가량 증가함에 따라 절단심도는 40-70 mm에서 70-130 mm로 2배 증가하였다. Fig. 8의 alumina의 경우 같은 조건에서 심도는 40-90 mm에서 60-130 mm로 약 1.5배 증가하였다. Fig. 9의 silicon carbide의 경우 심도는 30-55 mm에서 55-95 mm로 약 2배 증가하였다.

Fig. 10은 garnet, aluminum oxide, 및 silicon carbide를 연마재로 사용했을 때 이송속도 38 mm/min 및 75 mm/min에서의 절단심도를 비교한 도표이다. 투입량이 171 g/min으로 비교적 적은 alumina의 경우 이의 영향으로 절단심도가 전체적으로 5-10 mm

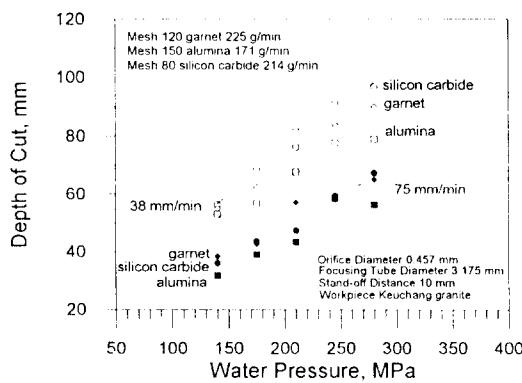


Fig. 10. Depth of cut vs. driving pressure with various abrasives.

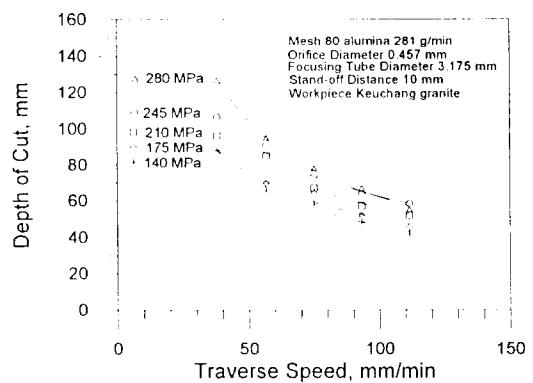


Fig. 12. Depth of cut vs. traverse speed with driving pressure as parameter (A80).

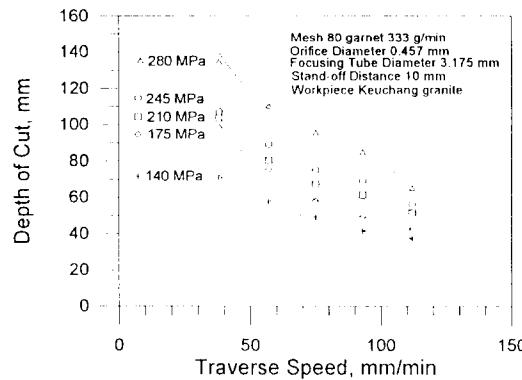


Fig. 11. Depth of cut vs. traverse speed with driving pressure as parameter (G80).

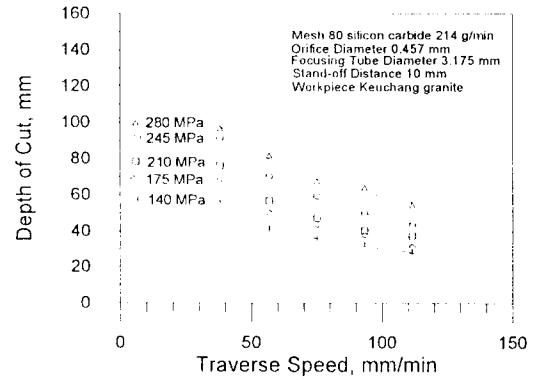


Fig. 13. Depth of cut vs. traverse speed with driving pressure as parameter (S80).

정도 낮은 값을 보이고 있지만 이 경우 연마재 투입량을 고려한다고 하더라도 다른 두 연마재에 비해 월등한 절단심도를 보이지는 않는다. Silicon carbide는 연마재 투입량이 garnet과 거의 비슷한 조건으로 38 mm/min의 저속에서는 절단심도가 가장 높게 나타나지만 75 mm/min의 비교적 고속에서는 garnet보다 절단심도가 작아지고 있다. 따라서 이 경우에서 세 연마재는 토출압력과 절단력과의 관계에서 큰 차이를 드러내지 않는다.

4.3 이송속도의 효과

Fig. 11, 12, 13은 앞절에서 살펴본 G80, A80 및 S80에 대한 절단심도 시험결과를 이송속도의 측면에서 각각 도시한 것이다. 그림에서 연마재의 투입량, 입자크기, 압력과는 별도로 노즐의 이송속도의 증가에 따라 절단심도의 증가율이 점감하는 양상을 나타낸다.

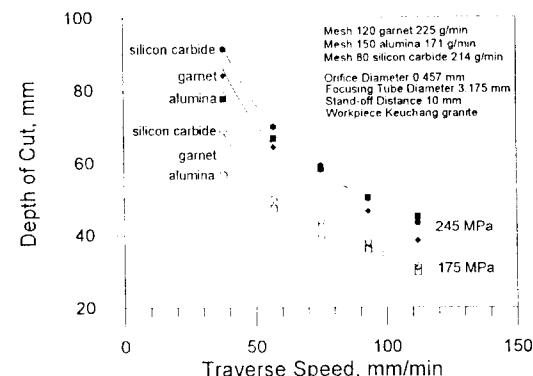


Fig. 14. Depth of cut vs. traverse speed with various abrasives.

Fig. 14는 Fig. 10의 토출압력과 절단심도와의 관계 시험 결과를 이송속도의 측면에서 검토한 그림이다. 따라서 시험조건은 전자와 동일하며 여기서는 토출압력

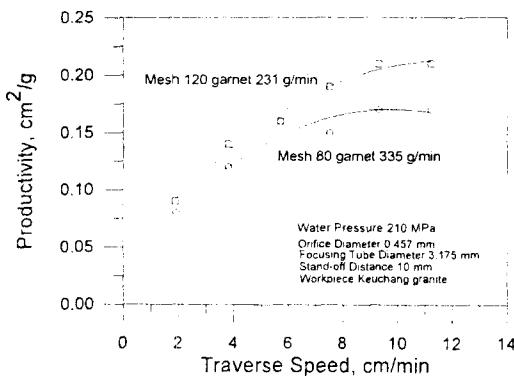


Fig. 15. Productivity of Garnet.

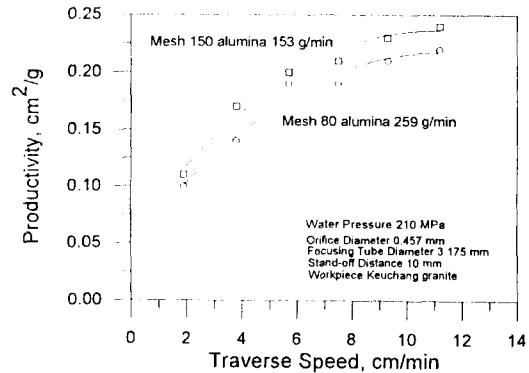


Fig. 16. Productivity of Aluminum Oxide.

을 175 MPa 및 210 MPa로 고정했을 때 이송속도의 변화에 따라 각 연마재의 절단심도가 어떻게 변화하는가를 알 수 있다. 토출압력 245 MPa의 경우 garnet은 57 mm/min 이상의 이송속도 수준에서 절단심도가 떨어지고 있으나 다른 연마재에 비해 10 mm 이상의 큰 차이는 보이지 않는다. 또한 이 시험에서 연마재 투입량의 차는 전체적으로 50 g/min 내외로 매우 적은 편이며 기타의 조건은 완전히 동일하다. 하지만 garnet은 가격이 훨씬 저렴하며 이 시험으로부터 garnet과 alumina는 절단력의 차를 거의 드러내지 않는다. Silicon carbide는 alumina와 마찬가지로 garnet에 비해 가격이 월등히 높은 편이며 특히 높은 경도로 인해 tapered sleeve와 focusing tube를 심하게 마모시키는 경향이 있다. 따라서 절단력이 크고 저렴하며 낮은 노즐 마모도를 갖춘 연마재는 garnet이라 생각된다.

4.4 연마재의 생산성(productivity)

연마재의 생산성은 (P , cm^2/g) 단위 중량의 연마재로 절단할 수 있는 절단대상 시료의 면적으로 정의되며 절단심도의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{VH}{F}$$

여기서, V =노즐 이송속도 [cm/min],

H =절단심도 [cm],

F =연마재 투입량 [g/min] 이다.

Fig. 15, 16, 및 17는 각각 garnet, alumina, 및 silicon carbide를 대상으로 하여 토출압력을 210

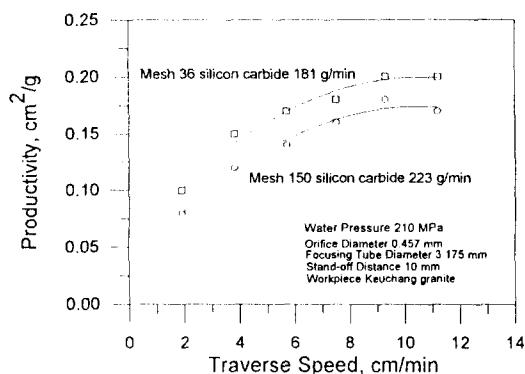


Fig. 17. Productivity of Silicon Carbide.

MPa로 고정하였을 때 이송속도에 대한 각 연마재의 생산성을 풀롯한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 연마재의 생산성은 이송속도가 증가함에 따라 전체적으로 증가하지만 그 기울기가 점차 완만하게 변화하는 특성을 보인다. 즉 이송속도가 일정 수준을 넘어서면 생산성이 오히려 떨어지게 된다. 따라서 최대의 생산성을 얻기 위해서는 노즐의 이송속도를 적절히 조절할 필요가 있다. 또 한가지 주목해야 할 사실은 각 그림에서 연마재 투입량이 큰 경우에 비해 적은 경우의 생산성이 더 크게 나타난 점이다. 이는 연마재 투입량이 필요 이상으로 증가하면 연마재 상호간의 간섭이 증대되어 절단대상 시료에 대한 충격 에너지량이 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 이송속도 9-11 cm/min 범위에서 garnet의 경우 생산성은 $0.17-0.21 \text{ cm}^2/\text{g}$ 정도이며, alumina는 가장 높은 $0.22-0.24 \text{ cm}^2/\text{g}$, silicon carbide는 $0.17-0.20 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 나타났다.

5. 결 론

연마재 종류에 따른 AWJ 시스템의 절단성능을 평가하기 위하여 garnet, aluminum oxide 및 silicon carbide의 세 가지 연마재를 대상으로 장비의 주요 운영 요소들인 고압수의 토출압력, 노즐 이송속도 및 연마재의 투입량과 입자크기 등의 각 요소를 변화시키면서 화강석인 거창석을 시료로 절단시험을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

절단심도는 연마재의 입자크기에는 큰 영향을 받지 않으며 연마재 투입량에 보다 의존적이다. 그러나 연마재 투입량이 일정 수준을 넘어서게 되면 연마재 상호간의 충돌로 절단심도는 오히려 감소될 수도 있다. 연마재 재질에 따른 절단 시험 결과를 살펴보면, 210 MPa의 토출압력과 평균 240 g/min의 연마재 투입량에서 garnet은 50-80 mm, aluminum oxide는 55-95 mm, silicon carbide는 40-70 mm 정도의 절단심도를 보였다. 즉, 주어진 운영요소의 수준에서 절단심도는 silicon carbide, garnet, aluminum oxide의 순으로 증가되고 있다.

연마재의 투입량이나 입자크기와는 별도로 고압수의 토출압력이 증가함에 따라 절단심도는 거의 선형적으로 비례하여 증가한다. Garnet의 경우 토출압력이 140 MPa로부터 280 MPa로 2배 가량 증가함에 따라 절단심도는 40-70 mm에서 70-130 mm로 2배로 증가하였다. Alumina의 경우 심도는 40-90 mm에서 60-130 mm로 약 1.5배로 증가하였다. Silicon carbide의 경우 심도는 30-55 mm에서 55-95 mm로 약 2배로 증가하였다. 일반적으로 토출압력이 증가할 때 절단심도가 커지는 요인중의 하나는 고압수 유량의 증가 때문이다. 그러나 가장 주된 원인은 토출압력을 증가시키면 연마재 입자들의 속도가 커지고 따라서 입자의 충격에너지가 증가되는데 있다. 한편, 노즐의 이송속도가 증가할 때 모든 연마재에 있어서 절단심도의 증가율이 점감하는 양상을 보이고 있다.

단위 중량의 연마재로 절단가능한 대상시료의 면적으로 정의되는 연마재의 생산성은 연마재의 절단능력 및 AWJ의 경제성 평가에 중요한 지표가 될 수 있다. 시험에서 나타난 연마재의 최대 생산성은 이송속도 9-11 cm/min 범위에서 garnet의 경우 생산성은 0.17-0.21 cm²/g 정도이며, alumina는 가장 높은 0.22-0.24 cm²/g, silicon carbide는 0.17-0.20 cm²/g로 나타났다.

연마재의 생산성은 이송속도가 증가함에 따라 증가하다가 속도가 일정 수준을 넘어서면 오히려 떨어지는 양상을 보이며 연마재 투입량이 큰 경우에 비해 적은 경우의 생산성이 더 크게 나타난다. 이것은 투입량이 필요 이상으로 증가하면 연마재 상호간의 간섭이 증대되어 시료에 대한 충격 에너지량이 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

시험에 사용된 garnet, aluminum oxide 및 silicon carbide의 화강석 절단성능을 비교해 볼 때 비슷한 시험조건일 경우 연마재간 절단심도의 차이는 최대 10-20 mm 정도로 상호간 절단력의 차이를 거의 드러내지 않았으며 연마재의 생산성도 최대 0.20 cm²/g 내외로서 비슷한 결과를 보였지만 silicon carbide는 높은 경도로 인해 tapered sleeve와 focusing tube를 심하게 마모시키는 경향이 있다. garnet은 silicon carbide나 aluminum oxide에 비해 가격이 훨씬 저렴하며 풍부하게 이용할 수 있는 연마재로서 AWJ시스템에 의한 화강석 절단 응용에서 높은 절단력과 경제성을 함께 갖춘 연마재이다.

참 고 문 헌

- 선우 춘, 최병희, 류창하, 1994, 초고압수에 의한 화강석 절삭연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 4, pp. 92-101.
- 선우 춘 외, 1995, 채석 및 가공 기술연구, 연구보고서 KR-94(C)1-9, pp. 149-166.
- 선우 춘 외, 1996, 채석 및 가공기술 연구 (II), 연구보고서 KR-95(C)-13, pp. 177-216.
- Agus, M., Bortolussi, A., Ciccu, R., 1994, Granite cutting with AWJ: Influence of abrasive properties, Proc. 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, pp. 223-239.
- Ciccu, R. et al., 1994, Waterjet in granite quarrying: the Italian experience, Proc. 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, pp. 281-288.
- Guo, M.S. et al., 1994, Modelling of abrasive particle disintegration in abrasive water jet cutting in relation to the recycling capacity, Proc. 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, pp. 567-587.
- Hashish, M., 1986, Aspects of abrasive-waterjet performance optimization, Proc. 8th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 297-308.

8. Hashish, M., 1990, Abrasive-fluidjet machinery systems: Entrainment versus direct pumping, Proc. 10th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 99-113.
9. Nakaya, M. *et al.*, 1984, Concrete cutting with abrasive waterjet, Proc. 7th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 281-292.
10. Norwood, J.A., Johnston, C.E., 1984, New adaptations and applications for waterknife cutting, Proc. 7th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 369-388.
11. Puchala, R.J. *et al.*, 1986, Mass concrete removal by high pressure water jet, Proc. 8th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 219-229.
12. Reichman, J.M., Cheung, J.B., 1978, An oscillating waterjet deep-kerfing technique, Int. J. Rock Mechanics, pp. 135-144.
13. Singh, P.J. *et al.*, 1994, Relative performance of abrasives in abrasive waterjet cutting, Proc. 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, pp. 521-541.
14. Summers, D.A., 1972, Water jet cutting related to jet and rock properties, Proc. 14th U.S. Symp. on rock Mechanics, pp. 569-588.
15. Summers, D.A., 1992, Water jet cutting of rock, concrete and steel-Trends for the future, Proc. Geomechanics '91, pp. 223-231.
16. Thiel, R. *et al.*, 1984, Deburring with water, Proc. 7th Int. Symp. on Jet Cutting Technology, pp. 337-352.
17. Vijay, M.M., 1992, Properties and parameters of water jets, Proc. Geomechanics '91, pp. 203-222.