

워터젯을 이용한 암석의 절삭에 관한 연구

김형목¹⁾ 이 정 인²⁾ 김 완 모³⁾ 최 병 회⁴⁾

1. 서론

워터젯이란 낮은 압력의 입력수가 고압펌프를 통과하면서 생성되는 고압·고속의 수류를 말한다. 1930년대 러시아에서 워터젯에 의한 채탄기술이 처음 개발된 이래 워터젯 응용기술은 급속한 발전을 거듭하여 오늘날 산업 각 부문에서 광범위하게 응용되고 있다. 일반적으로 워터젯이 널리 사용되고 있는 응용분야로는 암석이나 금속, 플라스틱 등 각종 재료의 절단·천공·밀링과 같은 절단 및 가공분야, 코팅이나 선박과 같은 금속표면의 녹이나 부착물의 제거 등과 같은 세정분야, 그리고 채탄·채광·채석·터널굴착의 보조수단 등과 같은 광업 및 토목 응용분야가 있으며 최근에는 안구수술, 치아세척 등의 의료분야에 까지 응용되고 있다. 또한 워터젯의 경우 복잡한 모양으로의 성형가공이 가능하다는 점과 함께 가공 후 재료에 미치는 역학적·물리적 영향이 거의 없다는 장점으로 인해 앞으로 그 응용분야는 무궁무진할 것으로 기대된다.

반면 국내에서는 세정분야 등의 특수한 분야에만 한정된 기술이 도입되고 있으며 각종 산업에의 응용을 위한 기초 연구는 아직 턱없이 부족한 실정으로 본 연구에서는 국내산 암석 시료를 대상으로 워터젯 절삭시험을 수행하여 대상시료의 역학적·물리적 특성과 시스템 성능변수가 절삭심도에 미치는 영향과 함께 절삭면의 거칠기를 측정하여 실험조건에 따른 결과를 비교·분석해 보았다.

2. 워터젯 기초이론

저압·저속의 입력수는 증압펌프(intensifier pump)를 통해 고압·고속의 수류로 생성된다. 증압펌프는 유압오일로 구동되는 피스톤 왕복식 펌프로서 그림 1과 같이 피스톤에 유압오일의 압력이 작용하면 피스톤에 붙어 있는 플런저는 다시 고압수 실린더 속의 물에 그 힘을 작용하여 물을 압축시킨다. 물이 압축되었을 때 유압오일이 피스톤에 가하는 작용력과 압축된 물이 플런저에 가하는 반작용력은 서로 평형상태에 도달한다.(식 1) 플런저의 단면적은 피스톤의 단면적에 비해 약 1/20 정도로 작기 때문에(이를 증압비라 한다) 고압 실린더 속의 물의 압력은 유압오일의 압력에 비례해서 20배 정도로 증가하게 된다.

$$P_w A_{pl} = P_0 (A_{ps} - A_{pl}) \quad P_w = P_0 \times \frac{A_{ps} - A_{pl}}{A_{pl}} \quad \frac{A_{ps} - A_{pl}}{A_{pl}} : \text{증압비} \quad (1)$$

여기서 P_w : 물의 압력, P_0 : 오일의 압력, A_{ps} : 피스톤의 단면적, A_{pl} : 플런저의 단면적이다. 증압펌프에 따라 증압비는 항상 일정하므로 토출되는 워터젯의 압력은 유압오일의 압력을 조정함으로써 조절할 수 있다.

3. 시료, 시험장치 및 시험방법

대상 시료로는 거창화강암, 여산대리석, 마천반려암, 보령사암을 사용하였고 본 시험에 사용한 워터젯 시스템의 개략적인 모습은 그림 2와 같다. 시험은 워터젯에 의해 암석을 절단하고 절삭심도를 측정하는 과정과 절삭면의 거칠기를 측정하는 두 부분으로 이루어진다.

암석시료를 가로·세로 300 mm, 높이 150 mm의 직육면체 블록으로 성형하여 절삭시험을

1) 서울대학교 자원공학과 석사졸업
2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
3) 서울대학교 에너지자원신기술연구소 특별연구원
4) 한국자원연구소 자원연구부 연구원

수행하고 생성된 홈의 심도는 본 시험을 위해 특별히 제작된 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다.

구해진 평균 절삭면 너비(절삭심도)는 약 2cm 정도로 거칠기 측정을 위해서는 5/10000 mm의 정밀도를 가지는 레이저 변위 측정기를 사용하였다. 측정은 절삭심도를 등간격으로 세분하여 10개의 축선에서 노즐이송방향으로 0.2 mm 간격으로 측정하였으며 각각의 축선에서 측정된 데이터들을 이용 프랙탈 차원화(fractal dimension, D) 시켰다. 본 연구에서는 분할자 길이(divider length, r)로 연속적으로 분할하였을 때 분할된 구획개수(N)를 분할자 길이에 대하여 로그-로그 그래프(log-log plot)로 표시하는 방법을 이용하였다.

4. 시험결과 및 결론

1) 워터젯에 의한 암석의 절삭심도는 워터젯 압력과는 정비례, 노즐이송속도와는 반비례관계를 보였으며 노즐이송횟수의 경우 3회 반복 행정이후 심도의 증가폭이 급격히 감소하였다. 노즐이격거리의 경우 노즐 직경의 110배까지는 절삭심도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 비절삭에너지의 경우 워터젯 압력보다는 노즐이송속도에 더 민감함을 알 수 있었다.

2) 암석의 역학적·물리적 특성과 절삭심도와와의 관계로부터 탄성과속도, 점하중 강도 등이 높은 상관 관계를 보였다. 워터젯에 의한 암석의 절삭이 일어나기 시작하는 최소임계압력을 일차 선형회귀법에 의하여 결정하였으며 거창석, 여산석, 마천석, 보령석의 최소임계압력은 각각 50, 30, 80, 125 MPa이다. 파괴인성지수와와의 상관관계로부터 워터젯 절삭용이성 지수를 정의하였다.

3) 워터젯에 의한 암석의 절삭면은 상부에서 하부로 내려갈수록 매끄러운 면에서 물결모양의 거친면이 형성되고 있으며 중간부분의 전이지대로 구분할 수 있다. 그 경계는 각각 최대 절삭심도의 40%, 70% 지점에서 형성된다.

4) 반복행정에서 양방향 절삭의 경우 프랙탈 차원값이 1.026으로 한방향 절삭의 1.03721보다 더 부드러운 면을 형성하였다.

5) 연마재 워터젯을 이용한 절삭면의 경우 순수한 물만을 사용했을 때보다 훨씬 매끄러운 면을 형성하였으며 다이아몬드 톱날을 이용한 절삭면과 비슷한 정도의 거칠기를 보였다. 연마재 워터젯 절삭면과 다이아몬드 톱날을 이용한 절삭면의 프랙탈 차원값은 각각 1.00918과 1.00528이다.

참고문헌

1. Hashish M., 1991, "Characteristics of surfaces machined with abrasive water jets", *Transactions of the ASME*, Vol. 113, pp. 354 ~ 362.
2. 奥村清彦 等, 1990, "岩石の切削深さに及ぼす吐出壓力とノズル送り速度の影響", *資源・素材學會誌*, 106 (No. 1), pp. 13 ~ 19.
3. 선우 춘 외, 1993, "채석기술개발 및 가공기술 기초연구", 한국자원연구소, KR-93-1D-2, pp. 85~130.
4. Whittaker B. N. et al., 1992, "Rock fracture mechanics-principles, design and applications", Elsevier Science Publisher.
5. Summers D. A., 1995, "Water Jetting Technology", Chapman & Hall.
6. Water Jet Technology Association(WJTA), 1998, "Jet News", news letter.

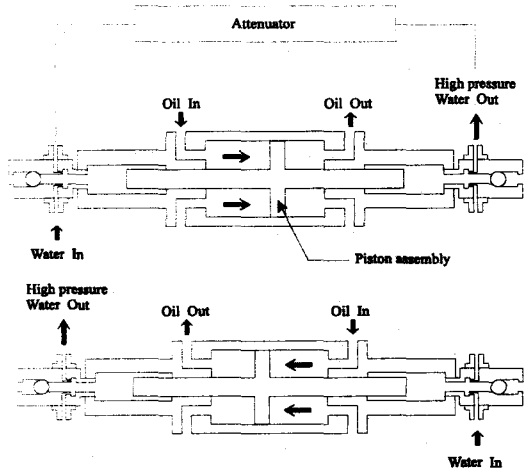


그림 1. 증압기(intensifier)의 개략도

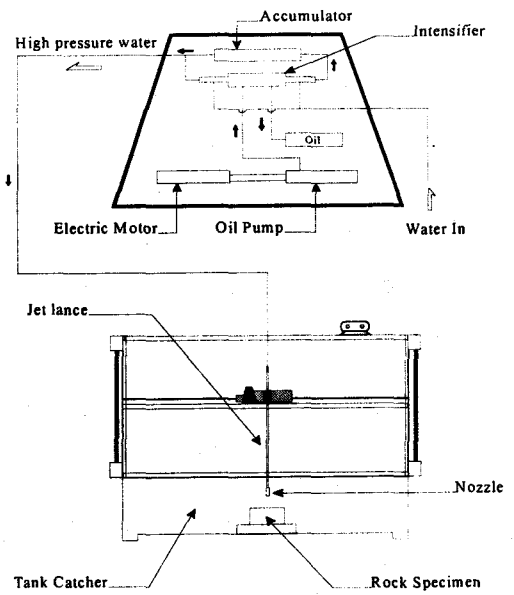


그림 2. 워터젯 절삭 시스템의 개략도

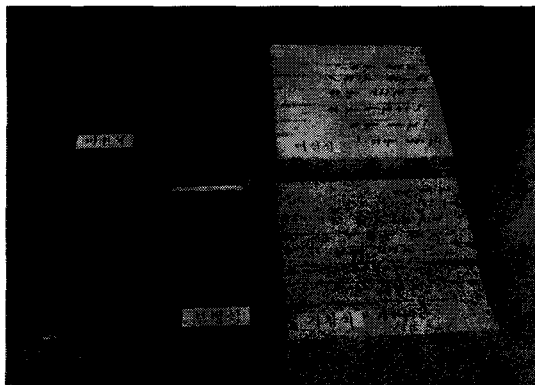


그림 3. 절삭시험 후 시료의 모습

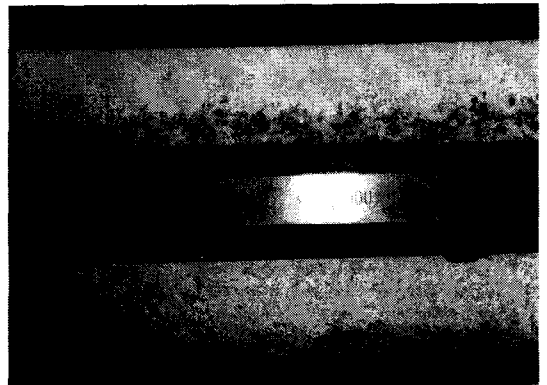


그림 4. 절삭면 거칠기측정을 위한 시료의 모습

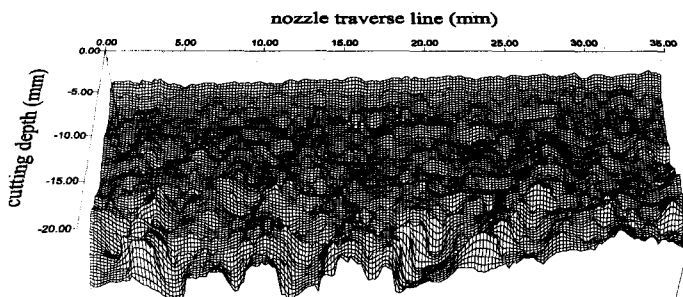


그림 5. 절삭면의 3차원적 도시

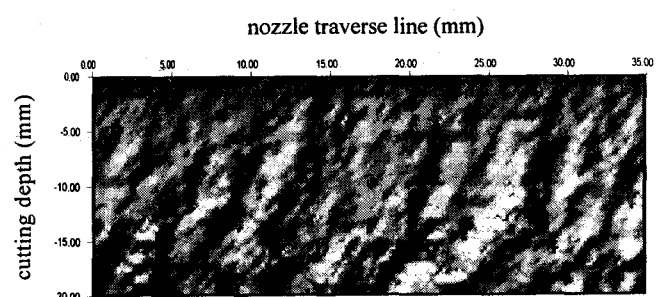


그림 6. 절삭면의 2차원 음영표시