

워터젯을 이용한 화강암 천공과 절삭 특성에 관한 연구 Studies on Drilling and Cutting Characteristics for Granite Rocks Using Waterjets

오태민¹⁾, Tae-Min Oh, 홍은수²⁾, Eun-Soo Hong, 조계춘³⁾, Gye-Chun Cho

- ¹⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- ²⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- ³⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

SYNOPSIS : Although rock excavation is necessary for the effective utilization of urban space, most conventional rock excavation methods, including the blasting method, cause high noise and vibration. Meanwhile, if a high pressure waterjet system is applied to excavate underground spaces in urban areas, the public grievance can be reduced by low noise and vibration. In this study, an abrasive waterjet system is designed and developed to study the influence of various performance parameters such as jet pressure, nozzle traverse speed, stand-off distance, or abrasive feed rate on waterjet excavation performance in laboratory. Using the developed waterjet system, rock drilling characteristics are identified by measuring drilling depths as a function of the jet exposure time. The drilling depth linearly increases with increasing the jet exposure time (under 60sec). Rock cutting characteristics are also obtained with various jet pressures (1600~3200kg/cm²) and nozzle traverse speeds (1.9~14.1mm/s): The cutting depth is nonlinearly related to the jet pressure and traverse speed. Indeed, the cutting depth increases with an increase in the jet pressure and a decrease in the nozzle traverse speed. This trend can be explained by energy transferring/loss mechanism.

Keywords : waterjet, rock drilling, rock cutting, jet pressure, traverse speed, stand-off distance

1. 서론

효율적인 도심지 공간 활용을 위한 지하공간이나 지하 교통구조물 시공에는 암반굴착이 필수적이거나, 도심지에서 암반굴착은 소음과 진동에 의한 민원을 많이 발생시킨다. 워터젯을 이용한 암반굴착은 저소음 저진동으로 민원을 극소화하며 효율적인 암반굴착을 가능하게 한다. 본 연구에서는 워터젯을 이용한 암반굴착 연구를 위해, 실내 워터젯 시스템을 개발/제작 하고 우리나라의 대표 암종인 화강암에 대해 워터젯 절삭 및 천공 실험을 실시하였다. 실내 워터젯 시스템은 다양한 변수(암석의 종류, 수압, 연마제의 유무, 노즐 이송속도 등)에 대해 최적화된 암석 절삭 및 천공실험을 할 수 있도록 설계 제작되었다. 워터젯 시스템은 건식으로 제작되어 노즐 입구에서 발생하는 고속 수류에 의한 압력의 차이로 연마제가 혼합되는 방식을 사용하여 시스템이 습식보다 간단하고 저유량으로 암반의 절삭 및 천공이 가능하도록 하였다(Agus et al., 1997).

워터젯에 의한 절삭 및 천공에 영향을 미치는 인자는 크게 에너지 매개변수, 워터젯의 기하학적 매개변

수, 그리고 대상 물질 매개변수로 나눌 수 있다. 에너지 매개변수는 워터젯에서 발생하는 에너지와 관련된 변수로 크게 동적인 요소들과 정적인 요소들을 포함하고 있다. 워터젯의 기하학적 매개변수는 노즐 끝과 대상 물질사이 거리나 각도에 관한 것이다. 마지막으로 대상 물질 매개변수는 워터젯의 절삭 또는 파쇄대상이 되는 물질에 관한 변수로 암석을 구성하는 물질이나 그 특성을 대변할 수 있는 기본 특성과 관련된 인자들이다. 본 연구에서는 제작된 건식 워터젯 시스템의 성능 검증과 더불어 암석 천공 및 절삭 특성을 확인하기 위해 에너지 매개변수를 이용하여 실내실험을 실시하였다. 에너지 매개변수로 대변할 수 있는 워터젯 수압, 노즐 이송속도, 그리고 분사시간을 변화하여 절삭 및 천공 깊이를 측정 분석 하였다.

2. 워터젯 시스템의 제작

워터젯 암반 굴착 메커니즘의 규명과 시스템의 최적화를 위해 실내실험은 필수적이다. 실내실험을 통해 다양한 변수(암석의 종류, 수압, 연마제의 유무, 노즐이동 속도 등)에 대해 최적화된 암반 파쇄 메커니즘을 구현할 수 있다. 실내 실험용 워터젯 시스템은 크게 초고압 펌프 시스템, 초고압 워터젯 노즐, 그리고 시험 테이블로 구성된다.

2.1 초고압 펌프 시스템의 제작

초고압 펌프 시스템은 크게 펌프부와 증압장치(intensifier) 부분으로 나눌 수 있다. 초고압 펌프 시스템은 모터를 이용하여 초고압 펌프를 구동하게 되고, 압력증강 장치는 펌프에서 나오는 물을 증압시켜 분출하는 시스템이다. 암반굴착을 위해 특수 주문 제작된 펌프 시스템의 세부적인 내용은 다음과 같다.

2.1.1 초고압 펌프

초고압 펌프(high pressure pump)는 모터와 유압펌프로 구성된다. 암반 파쇄를 하기 위해서는 강력한 모터가 필요하다. 여기서는 충분한 구동력 확보를 위해, 모터는 50마력을 사용하고 펌프는 사판식 피스톤 유압 펌프를 사용하였다(표 1 참조).

표 1. 초고압 펌프의 성능

모터		유압펌프		외형치수
		타입	용량	가로 × 세로 × 높이(mm)
50HP	37KW	사판식 피스톤 펌프	70cc	1700 × 950 × 1150

2.1.2 증압장치

증압장치는 고압을 받기 때문에 세라믹 플런저(ceramic plunger)의 사용으로 수명을 연장 할 수 있도록 하였다. 본 증압장치는 워터젯 수압을 420MPa까지 구현 가능하게 한다. 설치된 증압장치로 인하여 기존의 연구에서 수행 하지 못한 연구 뿐 만 아니라 더 다양한 연구가 가능할 것으로 추정된다. 증압장치의 성능은 표 2와 같다.

표 2. 증압장치의 성능

절단 압력		증압비	토출량 (l/min)	공급수량 (l/min)	축압기 용량(l)
최고(kgf/cm^2)	상용(kgf/cm^2)				
4200	3600	20:1	3.8	5	2.7

2.2 연마제 사용이 가능한 노즐의 제작

기본적인 천공과 절삭성능실험 및 특성을 확인하기 위해 가장 단순한 형태의 노즐을 설계 제작하였다. 시험 중 임의로 워터젯 펄스를 단속하기 위해 노즐에는 on/off 밸브를 통합적으로 설치하였고, 노즐의 측면에 연마제를 투입할 수 있는 장치를 두어 연마제를 이용한 워터젯이 가능하게 구성하였다(그림 1 참조).

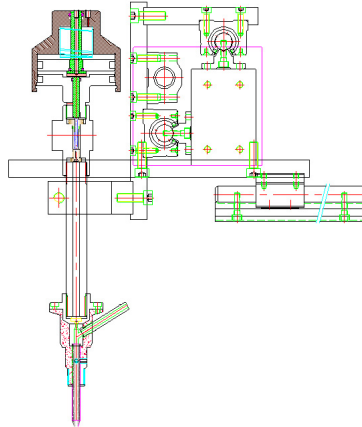


그림 1. 워터젯 노즐과 고정장치

2.3 실험 테이블의 제작

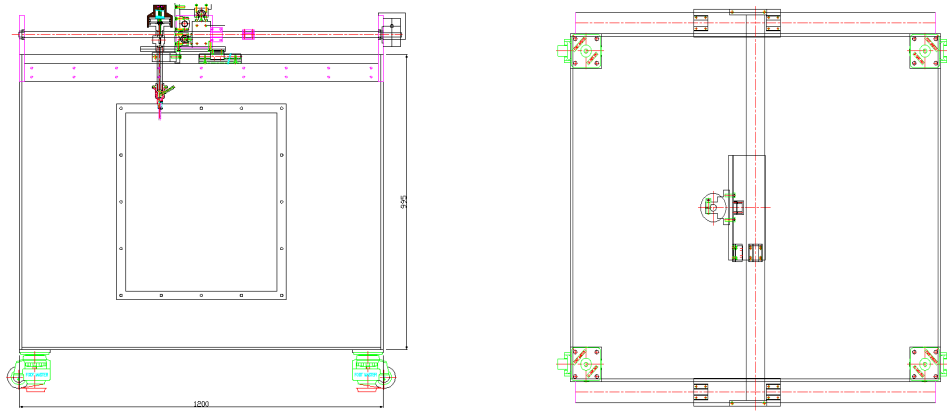
실험 테이블은 실험자를 보호하기 위해 박스(box) 형태로 설계하였다(그림 2a 참조). 내부에 암석시료 고정대를 설치하고 실험 테이블 상단에 노즐 구동부와 이송속도 시스템을 설치하여 이송속도 조절을 가능하게 하였다(그림 2b 참조). 방호벽과 노즐 구동부에 관한 자세한 사항은 다음과 같다.

2.3.1 방호벽

워터젯을 이용한 실험은 초고압수를 사용하기 때문에 실내 실험을 하는 데에 있어서 주의가 필요하다. 그러므로 시험대를 제작함에 있어서 부식저항성과 강도가 큰 SUS316(항복강도: 21kgf/mm^2 , 인장강도: 53kgf/mm^2 , 연신율: 35%)를 사용하여 1m 높이의 방호벽을 설치하였다. 전면부에는 특수 아크릴 재질을 사용하여 실험시 관찰을 할 수 있도록 하였다(그림 2a 참조). 바닥의 저면에는 배수구와 필터제를 설치하여 사용된 물을 재사용 할 수 있도록 하였다.

2.3.2 노즐 구동부

암반의 절삭에 있어서 노즐의 이동속도는 절삭깊이와 같은 효율성에 중요한 영향을 미친다. 시험대에 노즐을 고정할 수 있는 장치를 설치하고 모터 시스템과 볼 베어링을 이용해 노즐의 이동속도를 조절 할 수 있도록 하였다.



(a) 정면도

(b) 평면도

그림 2. 워터젯 실내시험대

3. 실험개요

3.1 실험 방법

워터젯을 이용한 암석의 절삭 및 천공실험에서 효율성 지표로 사용할 수 있는 절삭 및 천공 깊이의 경우 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다. 실제 현장에서 워터젯을 이용하여 암석을 절삭할 때 굴착의 효율성은 무엇보다도 중요하다. 암석시료 절삭을 위한 실내실험에서, 에너지 매개변수와 직결되는 인자를 워터젯 수압(1600, 2400, 3200kg/cm²)과 노즐 이송속도(1.9, 7.3, 11.2, 14.1mm/s)로 정하여 절삭 깊이의 변화를 관찰하였다(그림 3 참조). 또한 워터젯 분사시간에 따라 천공깊이 변화를 확인하기 위해, 연마제를 사용하여 3200kg/cm²의 수압에서 노출시간을 60초까지 증가시키면서 천공깊이를 측정하였다.

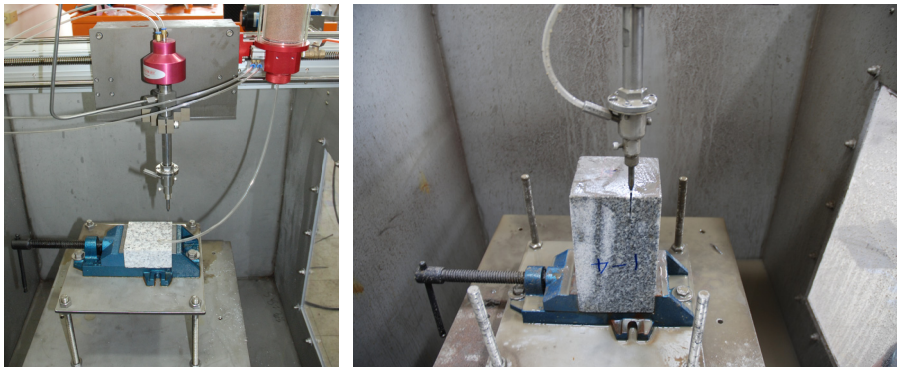


그림 3. 워터젯 암석 실내실험

3.2 암석시료의 물리적 특징

워터젯을 이용한 암석 천공 및 절삭 실내실험을 실시하여, 화강암의 최대 절삭가능 깊이를 확인하기 위해 전라북도 익산시 황등면에서 채취한 황등석을 사용하였다. 워터젯 절삭실험에서 대상 시료의 물리적 특성에 따라 절삭 가능깊이가 다를 것으로 예상된다. 일반적으로, 암석의 공극률과 입자의 크기가 암석과쇄 효율성에 미치는 영향은 크다(Hlaváč, 1995; Agus et al., 1997). 실험에 사용된 암석시료의 물리적 특징은 표 3과 같다. 압축강도는 원주체(Ø10×20cm)시료를 기준으로 실험하였고 R값은 슈미트 해머 실험을 통해 구해진 반발(rebound)값이다. 그리고 동적 물리특성을 확인하기 위해 FFRC(Free-free

resonance column test)를 실시하여 동탄성계수(E)와 P파 속도를 획득하였다.

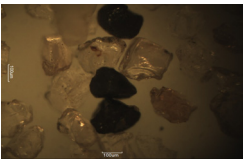
표 3. 화강암시료의 물리적 특성

암석 종류	밀도 (kN/m^3)	비중	공극률 (%)	흡수률 (%)	압축 강도 (MPa)	인장 강도 (MPa)	동탄성 계수 (MPa)	V_p (m/s)	R 값
황등석 (화강암)	25.68	2.64	1.04	0.39	100.0	10.2	30.2	3394	54

3.3 연마제의 물리적 특징

연마제의 특성에 따라 절삭깊이나 효율성이 달라진다. 연마제는 경도가 강해야 하고 입자는 노즐을 통과할 만큼 작아야 한다. 일반적으로 입자가 거칠수록 파쇄 효율성은 증가한다(Summers, 1995; Agus et al., 1997). 본 실험에서 사용된 연마제의 물리적 특성은 표 4와 같다.

표 4. 연마제의 물리적 특성

연마제 종류	연마제 입자	조성	모스 경도	비중	입자크기
석류석(garnet)		$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	7.5~8.5	3.9~4.1	0.3mm 이하

4. 결과 및 고찰

4.1 워터젯을 이용한 암석 천공

4.1.1 분사시간에 따른 천공 깊이

연마제 워터젯을 이용한 천공실험은 노즐이 고정되어 있는 상태에서 분사 노출시간의 길이에 따라 천공깊이를 측정하는 것으로 실시되었다. 신뢰도 있는 결과값을 얻기 위해, 최초 노즐과 암석시료 사이의 거리는 10mm 그리고 워터젯 압력은 3200kg/cm^2 를 유지하였다. 노즐이 고정되어 있을 때가 노즐이 이동할 때 보다 더 많은 분사 노출시간을 유지하기 때문에 더 많은 파쇄 에너지를 가하게 된다. 실험결과 워터젯의 분사 노출시간(60초 까지)에 따라 천공깊이가 선형에 가까운 경향성을 가지며 증가하는 것을 관찰할 수 있다(그림 4 참조). 그러나 노출시간에 따라 천공깊이가 충분히 깊어지면, 노즐과 시료의 타격거리가 길어져서 초반과 같은 효율을 보여주기 힘들다(Brook et al., 1969; Summers, 1995). 본 실험에서의 경우 충분한 워터젯 에너지(3200kg/cm^2)로 인해, 60초 동안의 천공시간 까지는 노즐과 시료 타격거리에서 큰 에너지 손실이 없는 것으로 판단된다. 워터젯에 의한 천공모양은 원뿔과 같은 형태이고, 노출시간이 길어질수록 천공입구가 커지는 것으로 관찰되었다(그림 5 참조).

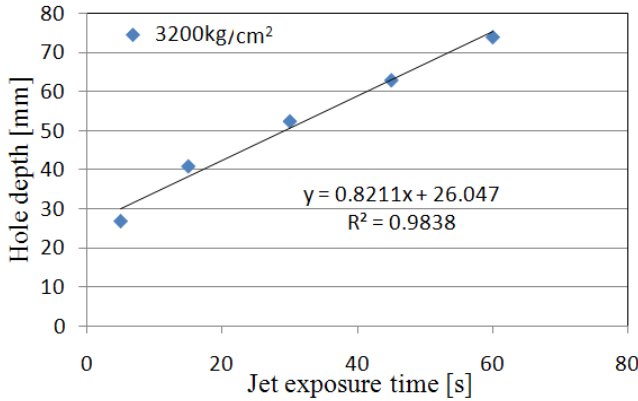


그림 4. 워터젯 분사 노출시간에 따른 천공깊이

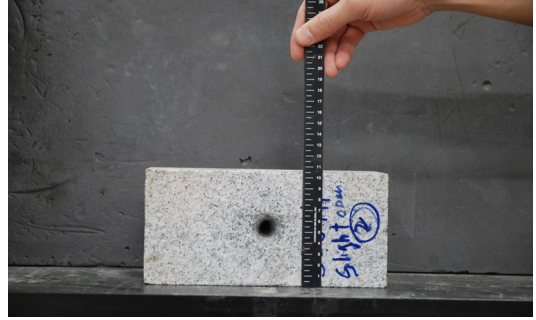


그림 5. 화강암 천공사진

4.2 워터젯을 이용한 암석 절삭

4.2.1 분사압력에 따른 절삭 깊이

워터젯 토출압력에 따라 절삭깊이 상관관계를 확인하기 위해 토출압력을 1600, 2400, 3200kg/cm²로 변화시켜 절삭깊이를 측정하였다. 수압-절삭깊이 상관관계 실험을 위해 일정한 1.9mm/s 이송속도, 10mm 이격거리, 그리고 19.3g/s 연마제 투입량을 유지하였다. 본 실험에서 토출 압력을 3200kg/cm²으로 했을 때 최대 절삭깊이는 47mm로 확인되었다. 워터젯 토출압력에 따라 절삭깊이는 토출압력이 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가한다고 알려져 있다(Harris et al., 1974; Summers, 1995). 그러나 실제로 높은 압력에 의해 깊이가 깊어질수록 노즐과 타격거리는 길어지고, 물-연마제 혼합수와 절삭된 표면과의 마찰로 인해 워터젯의 타격에너지는 감소할 것이다. 수압과 절삭깊이의 상관관계를 반대수관계(semi-log scale)에서 선형으로 가정한다면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$D = \alpha \cdot \ln(P) - \beta \quad (1)$$

여기서, D는 절삭깊이, P는 워터젯 수압, α 와 β 는 실험 상수이다. 분사압력과 절삭깊이의 관계는 그림 6과 같으며, 이로부터 식 (1)의 상수들을 결정할 수 있는데 각각 α 는 52.6, β 는 375.2로 나타났다.

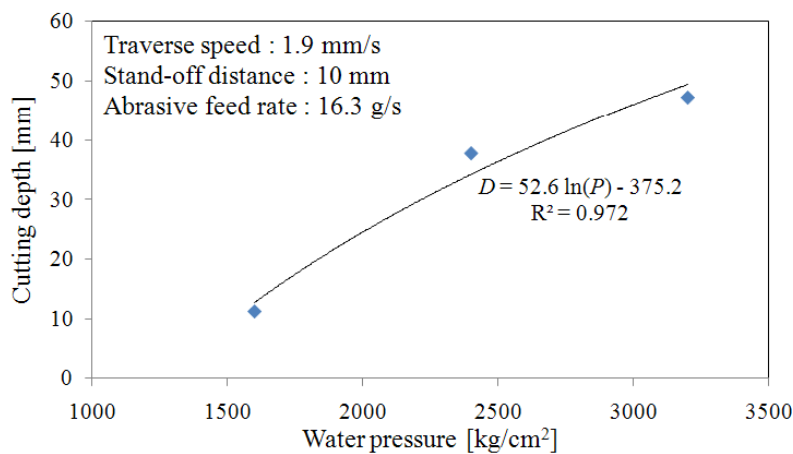


그림 6. 분사압력에 따른 화강암 절삭깊이

4.2.2 노즐 이송속도에 따른 절삭 깊이

워터젯 노즐의 이송속도는 파쇄에너지의 공급량과 관련된다. 노즐의 이송속도가 빨라지면 시료의 절삭부분에 그 만큼 작은 에너지가 전달된다. 그러므로 노즐의 이송속도가 증가함에 따라 절삭효율성은 급격히 하락한다(Harris et al., 1974; Hlaváč, 1995). 본 실험에서 이송속도가 약 7mm/s 이상이 되면 이송속도가 절삭 깊이에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다(그림 7 참조). 반면 낮은 이송속도(본 연구에서는 7mm/s 이하)에서는 이송속도에 따라 절삭깊이가 매우 민감하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

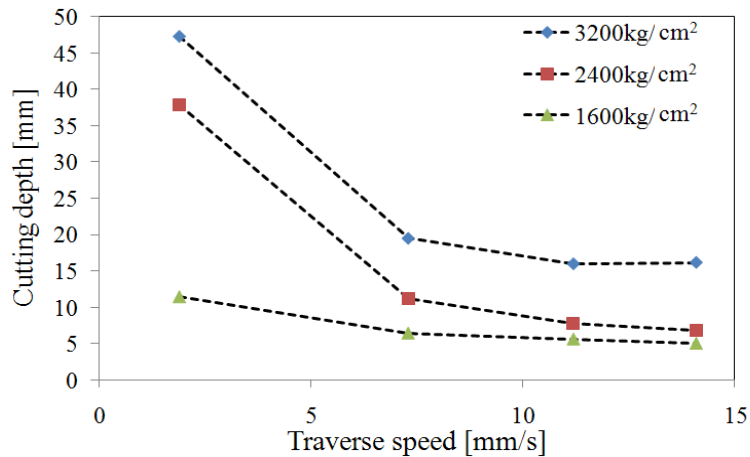


그림 7. 이송속도에 따른 화강암 절삭깊이

5. 결론

본 연구에서는 연마제 워터젯 시스템을 이용하여 분사시간에 따른 암석 천공깊이를 확인하고, 노즐 이송속도와 토출압력에 따라 절삭깊이를 측정하여 그 영향을 고찰하였다. 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 천공실험을 위한 워터젯 토출압력 3200kg/cm²에서, 분사 노출시간(60초 까지)에 따라 화강암 시료의 천공깊이도 선형으로 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 토출압력이 낮은 상태에서 실험을 하거나 천공깊이가 충분히 깊어지면 주어진 에너지가 천공깊이까지 도달하기 힘들어 초기 상태의 효율성을 유지할 수 없을 것으로 판단되어 진다.
- 2) 워터젯 분사 압력과 이송속도는 절삭에 소요되는 에너지와 밀접하게 관련된 변수로 분사 압력이 증가하면 절삭깊이도 비선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 또한 이송속도가 감소할수록 미소면적에 작용하는 타격에너지가 증가하여, 그에 따라 절삭깊이도 증가하는 것으로 확인하였다.
- 3) 화강암 시료의 천공과 절삭실험 결과를 동일한 토출압(3200kg/cm²)에서 비교분석하면, 노즐이 1.9mm/s의 이송속도로 움직일 때 절삭깊이는 약 47mm이고 같은 천공깊이에서 분사 노출시간은 25.8초로 관찰 되었다. 이것은 파쇄된 깊이를 절삭효율의 지표로 삼는다면, 노즐을 조금씩 움직이며 천공하는 것이 깊게 파쇄하는 쪽에는 더 유리하다는 것으로 판단되어 진다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 07첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Agus, M. and Bortolussi, A. (1997), "A Comparative Study of Suspension and Injection Methods in Rock Cutting with Abrasive Waterjet", *9th American Waterjet Conference*, Dearborn, Vol. 1, pp.47-59.
2. Brook, N. and Summers, D. A.(1969), "The Penetration Of Rock By High-Speed Water Jets", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 6, pp.249-258.
3. Harris, H. D. and Mellor, M.(1974), "Cutting Rock with Water Jets", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, Vol. 11, pp.343-358.
4. Hlaváč, L. M. (1995), "Physical Analysis of the Energy Balance of the High Energy Liquid Jet Collision with Brittle Non-homogeneous Material", *8th American Waterjet Conference*, Houston, Vol. 2, pp.681-697.
5. Summers, D. A.(1995), *Waterjetting Technology*, Chapman & Hall, London.