Research Paper

복수의 워터젯 노즐 운용변수에 따른 화강암 천공성능 및 형상 분석

박준식¹·차현종²·홍은수³·전형우⁴·오태민^{5*}

¹비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 ²비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 학사과정 ³정회원, (주)에이치비씨 대표이사 ⁴비회원, (주)제영이엔씨 대표이사 ⁵정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 조교수

Analysis of drilling performance and shape for granite according to operating parameters of waterjet nozzles

Jun-Sik Park¹ · Hyun-Jong Cha² · Eun-Soo Hong³ · Hyung-Woo Jun⁴ · Tae-Min Oh^{5*}

¹MS.C. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (PNU)

²Undergraduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (PNU)

³President, HBC INC.

⁴President, Jeyoung Engineering & Construction

⁵Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (PNU)

*Corresponding Author : Tae-Min Oh, geotaemin@pusan.ac.kr

Abstract

Waterjets for rocks have various advantages of the non-contact and eco-friendly excavation using only water and abrasive. To overcome the problems (e.g., dust and noise occurrence) of the conventional drilling methods, waterjet excavation methods are broadly used. It is advantageous to operate a couple of nozzles in order to increase the waterjet excavation efficiency. When multiple nozzles are used, it is essential to analyze the excavation performance and shape according to the nozzle operation method. In this study, nozzle angle, horizontal distance between nozzles, and standoff distance were defined as nozzle operating parameters and the excavation performance and shape were analyzed. As a result of the experiment, when the nozzle angle and standoff distance are increased, the excavation depth is decreased and the effective depth tends to be increased. In addition, based on the experimental results, the excavation shape criteria required for nozzle insertion were proposed and optimal nozzle operating parameters were derived according to the criteria. This study result is expected to be used as useful basic research in the future development of multiple waterjet nozzles for rock drilling.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association 23(6)589-604(2021) https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.6.589

eISSN: 2287-4747 pISSN: 2233-8292

Received October 26, 2021 Revised November 17, 2021 Accepted November 17, 2021



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright C 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: Waterjet drilling, Granite, Nozzle operating parameter, Excavation shape, Excavation performance

초 록

워터젯 암반 굴착공법은 물과 연마재만을 사용하는 친환경 및 비접촉식 굴착방법으로 다양한 장점을 가지고 있다. 최근 에는 기존 천공 공법의 문제점을 보완하고 분진 방지, 소음 저하 등의 이유로 워터젯 공법의 활용이 증가하고 있다. 워터 젯 굴착효율을 증대시키기 위해서는 복수의 노즐을 운용하는 것이 유리하다. 복수의 노즐을 사용할 경우, 노즐 운용방법 에 따른 굴착성능과 형상을 분석하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 노즐각, 노즐 간 수평거리, 이격거리를 노즐 운용 변수로 정의하고 굴착성능과 형상을 분석하였다. 실험결과, 노즐각과 이격거리가 증가할 때 굴착깊이는 감소하였고 유 효 굴착깊이는 증가하는 경향을 보였다. 또한, 실험결과를 바탕으로 노즐 삽입에 필요한 굴착형상 기준을 제안하고 기준 에 따른 최적 노즐 운용변수를 도출하였다. 본 연구결과는 향후 암반 천공용 다중 워터젯 노즐 개발 시 유용한 기초연구 로 활용될 것으로 기대된다.

주요아: 워터젯 천공, 화강암, 노즐 운용변수, 굴착형상, 굴착성능

1. 서 론

지하 구조물 및 터널은 도심지 공간활용의 효율성과 교통량의 증가로 건설 요구가 확대되고 있다. 기존의 기계 굴착공법은 단단한 암반층 굴착 시, 접촉면의 마모로 인한 유지비용 및 시공효율 측면에서 단점을 가진다(Perrott, 1979; Plinninger, 2008). 국내외에서 사용되는 암반 발파공법의 경우, 도심지 주변지반 및 구조물에 균열을 발생 시켜 안정성을 저하시킨다(Shin et al., 2009). 반복적인 발파로 발생하는 진동 또한 시공 안정성을 저하시킨다 (Nakano et al., 1993). 이에 따라 기존의 단점을 보완하는 새로운 고효율/저진동 지하 암반 굴착공법 개발이 요구 된다.

연마재 워터젯 굴착기술은 기존 굴착/천공공법의 문제를 해결하는데 좋은 보완공법으로 활용될 수 있다. 연마 재 워터젯 굴착은 물과 연마재를 사용하는 친환경적 공법이며, 대상 암반과 비접촉식으로 파쇄가 진행되므로 장 비 마모에 대한 우려가 적다. 이러한 장점들로 인해 연마재 워터젯을 활용한 암반 굴착에 관한 연구가 다수 수행 되고 있다(Anwar, 2013; Momber, 2016; Ren et al., 2020). 또한 기존 굴착/천공공법에 워터젯 시스템을 보조 공 법으로 활용해 굴착효율을 개선하고 진동, 분진 감소 등의 부가적인 이점을 확보한 사례가 다양하게 보고되고 있 다(Kim and Park, 2003; Oh et al., 2012; Lu et al., 2013; Liu et al., 2017).

실제 천공현장은 설계 깊이까지 연속적으로 굴착하는 과정이 요구된다. 워터젯은 대상 암반과 멀어질수록 젯에너지가 소산되어 굴착효율이 감소한다(Oh and Cho, 2016). 따라서 굴착면에 노즐을 삽입하여 굴진시키는 것이 효율적이다. 노즐 삽입을 위해 기준 굴착폭 이상이 확보되어야 한다. 또한, 암반 파쇄 과정에서 할암봉 삽입이나 장약을 투입하기 위해 기준 굴착폭 이상이 확보되어야 한다. 이때 단일 노즐은 필요한 굴착폭을 확보하기 어려

위 복수의 노즐을 활용하는 것이 합리적이다(Oh and Cho, 2012). 복수의 노즐을 활용하면 굴착성능이 향상되고, 원하는 천공형상을 유지하는데 적합하다. 그러나 복수의 노즐을 활용할 경우, 각각의 젯(jet)의 간섭이 발생하여 굴착력이 감소하거나 굴착범위가 중첩되어 굴착형상이 변화하는 현상이 발생할 수 있다(Oh et al., 2021). 굴착형 상은 노즐의 중심에서 최대 깊이가 생성되고 젯의 영향반경 외곽으로 갈수록 파쇄깊이가 줄어드는 형상을 보인 다. 따라서 복수 워터젯 노즐의 영향반경 외곽부분이 중첩되도록 설계해야 일정한 깊이의 굴착형상이 확보된다. 중첩도를 증가시키기 위해 다수의 노즐을 사용하면 삽입에 필요한 굴착폭 확보와 굴착성능 측면에서 유리하지만 사용하는 총 유량이 증가함으로 고가의 펌프가 요구되는 단점이 있다.

두개의 워터젯 노즐을 단순히 설치하여 사용하는 경우, 노즐 간 거리가 멀어 젯 영향반경의 중첩도가 낮아 일정 한 굴착형상을 확보하기 어려울 수 있다. 이러한 결과는 워터젯의 전체적인 굴진효율을 저하시킨다. 두개의 워터 젯 노즐을 활용 시 노즐의 각도, 노즐 간 거리, 이격거리를 조절한다면, 각 노즐이 분사하는 젯의 영향반경의 중첩 도를 적절하게 변화시킬 수 있다. 따라서 워터젯을 굴착에 효율적으로 활용하기 위해선 노즐 운용에 따른 굴착성 능과 형상의 변화를 사전에 파악하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 두개의 연마재 워터젯 노즐을 활용하여 화강암에 대한 굴착 실내실험을 수행하였다. 노즐 운용 방법에 따라 변화하는 노즐각(θ), 노즐 간 수평거리(HD), 이격거리(SOD)를 실험변수로 설정하여 실험을 수행 하였다. 실험결과를 토대로, 노즐 운용변수에 따른 굴착성능과 형상을 분석하였다. 실험 후 형성된 유효 굴착깊이 (Effective depth)에 따른 잔여율(Remaining rate)을 정의하고 굴착 효율성을 평가하는데 활용하였다. 또한 효율 적인 굴착이 가능한 노즐 운용변수를 제시하였다. 본 연구에서 파악된 복수의 노즐 운용변수와 굴착성능 변화 특 성은 향후 워터젯 암반천공 굴착 시 기초 실험자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. 워터젯 실내실험 방법 및 준비

2.1 실험 방법

노즐 운용변수에 따른 천공성능 실험을 위해, 워터젯 운동에너지 생성과 관련된 변수인 수압, 유량, 연마재 투 입율은 고정하였다. 펌프에서 생성되는 수압은 182 MPa이 유지되도록 설정하였다. 펌프에서 생성되는 유량은 21.4 L/min이며 각각의 노즐에 10.7 L/min씩 분배되도록 설계하였다. 연마재 탱크에서 공급되는 연마재의 양은 208 g/s이며, 각각의 노즐에 104 g/s씩 투입되도록 조절하였다.

복수의 워터젯 노즐을 활용하여 암반을 천공하는 조건에서 워터젯의 굴착 성능 및 형상은 워터젯 노즐 운용방 법의 영향을 받는다. 본 연구에서는 두 개의 노즐을 사용하였으며, 워터젯의 굴착성능에 영향을 끼치는 노즐 운용 변수를 주요 실험변수로 설정하였다(Fig. 1). 노즐 각(θ)은 워터젯의 암반 타격각도에 영향을 끼치는 변수로 수 직기준으로 정의한다. 노즐 간 수평거리(HD)는 노즐 끝 간의 수평거리로 정의한다. 이격거리(SOD)는 암반시편 의 표면과 워터젯 노즐 사이의 수직거리로 정의된다.



Fig. 1. Concept of nozzle operating parameters and measurement indices

워터젯 노즐운용 변수에 따른 굴착성능 및 형상을 분석하기 위해 노즐 2개를 수직마운트에 설치하여 노즐각 (θ)과 노즐 간 수평거리(HD), 이격거리(SOD)를 조절한 뒤 24초 동안 굴착실험 수행하였다(Fig. 2). 실험변수로 노즐각은 0°, 0.5°, 1°, 1.5°로 조절하였다. 노즐 간 수평거리는 40 mm, 45 mm, 50 mm, 55 mm 그리고 이격거리 는 300 mm, 450 mm, 600 mm, 750 mm로 설정하였다. 상기 노즐 운용변수에 따라 총 64회의 실험 케이스(test cases)로 나누어 실험이 진행하였다(Table 1).



(a) Two water jetting on granite specimen

(b) Removal shape after jetting

Fig. 2. Waterjet laboratory tests

Water flow	Abrasive	Jet exposure	Water	Standoff distance	Nozzle angle	Horizontal	
rate	feed rate	time	pressure	(SOD)	(0)	distance (HD)	Test cases
(L/min)	(g/s)	(sec)	(MPa)	(mm)	(°)	(mm)	
			3 4 182 6 7		0	40	
				300	0.5	45	$4 \times 4 = 16$
					1	50	cases
					1.5	55	
10.7 per nozzle	104 per nozzle				0	40	$4 \times 4 = 16$
		104 24 nozzle		450	0.5	45	$4 \times 4 = 16$
					1	50	cases
					1.5	55	
				600	0	40	
					0.5	45	$4 \times 4 = 16$
					1	50	cases
					1.5	55	
				750	0	40	
					0.5	45	$4 \times 4 = 16$
					1	50	cases
					1.5	55	

Table 1. Test cases

실험 후 굴착성능의 평가지표로 암반 시편의 굴착깊이(D), 굴착폭(W), 유효 굴착깊이(D_e)를 측정하여 굴착성 능을 분석하였다(Fig. 1 참조). 굴착깊이는 굴착 전 암석시편의 표면과 굴착형상의 최하단 간의 수직거리로 정의 하였다. 두 개의 노즐이 굴착한 각각의 굴착깊이는 미세한 차이가 있기 때문에 평균값을 사용하였다. 굴착폭은 굴 착된 형상의 가로폭 길이로 정의하였다. 유효 굴착깊이는 굴착 전 암석시편의 표면과 굴착형상의 최상단 간의 수 직거리로 정의하였다. 시편의 굴착깊이와 굴착폭, 유효 굴착깊이는 각 3회 이상 측정하여 평균값으로 평가하였 다. 굴착깊이는 워터젯의 굴착 속도를 반영하는 측정지표로 활용하였으며, 굴착폭 및 유효 굴착깊이는 연속적인 굴착을 위한 워터젯 노즐 삽입의 가능여부 지표로 사용되었다.

2.2 실험 준비

굴착실험에 사용된 워터젯 시스템은 워터젯 펌프, 물탱크, 연마재 탱크, 두 개의 워터젯 노즐, 수직 노즐마운트 장치로 구성된다(Fig. 3). 수직 노즐마운트 장치는 실험변수를 조절하는 장치로 노즐을 설치한 뒤 노즐 각, 노즐 간 수평거리, 이격거리를 계획한 실험변수 값으로 조정할 수 있도록 설계되었다. 워터젯 펌프는 물탱크로부터 공급받 은 물을 가압하여 고압수의 형태로 워터젯 노즐에 공급하는 장비이다. 연마재 탱크는 공압장치를 통해 일정한 양 의 연마재를 워터젯 노즐에 공급하는 장비이다. 고압수는 워터젯 노즐 내부의 오리피스(orifice)를 통해 젯(jet)의 형태로 가속된 후, 공급된 연마재와 믹싱 챔버(mixing chamber)에서 혼합된다. 가속된 젯은 포커싱 튜브(focusing tube)를 통해 분사되어 암반 시편을 굴착한다. 실험에 사용된 워터젯 펌프와 노즐의 제원은 Table 2와 같다.



Fig. 3. Schematic diagram of waterjet system setup for experiment

Table 2. Wateriet p	ump and nozzle	specification
---------------------	----------------	---------------

Pump type	Max power (HP)	Max discharge pressure (MPa)	Max. water flow rate (L/min)	Focusing tube inner diameter (mm)	Focusing tube length (mm)	Orifice inner diameter (mm)
Plunger type Diesel	245	300	24	2.5	150	0.75

실험에 사용된 암반 시편은 가로 150 mm, 세로 150 mm, 폭 300 mm의 블록 형태로 제작되었으며, 화강암 시 편의 물리적 특성은 Table 3과 같다. 실험에 사용된 연마재는 입경 #30-60 mesh (D₅₀: 0.4 mm)인 석류석을 사용 하였으며, 연마재의 모스 경도는 7.5-8.5 그리고 비중은 약 4.1이다.

Table 3. Specimen properties of rock specimen

Rock type	Density (g/cm ³)	UCS (MPa)	Absorption rate (%)	Porosity (%)
Granite	2.65	210.2	0.31	0.83

3. 워터젯 굴착성능 결과 및 분석

본 연구에서는 워터젯 노즐 운용변수에 따른 암반 굴착성능을 분석하였다. 노즐각, 노즐 간 수평거리, 이격거 리를 변화시키며 실험을 수행하였다. 암반 굴착성능은 굴착속도와 밀접한 연관이 있는 평가지표인 굴착깊이(D) 와 연속적인 굴착과정에서 노즐 삽입여부를 평가하는 굴착폭(W)으로 나누어 분석하였다. 굴착깊이는 두 개의 노 즐이 굴착한 깊이의 평균값을 활용하였다. 두 노즐이 굴착한 최대굴착깊이의 차이는 ±5% 이내의 범위를 가진다.

3.1 굴착깊이 결과 및 분석

Fig. 4는 이격거리(SOD) 증가에 따른 굴착깊이(D) 변화를 나타낸다. 이격거리가 증가함에 따라 형성된 굴착 깊이는 감소하는 경향을 보인다. 굴착깊이는 이격거리가 300 mm에서 750 mm로 증가할 때 평균 67.7 mm에서 평균 56.9 mm로 12% 감소하였다. 이러한 결과는 이격거리 증가에 따른 공기중 젯 에너지의 소산이 암석표면에 서 생성되는 타격에너지를 감소시키기 때문이다(Oh and Cho, 2016). 그러나 기존의 연구결과(유량조건 1.2~8.8 L/min)와 비교하여 본 연구에서 사용된 유량(10.7 L/min)이 상대적으로 크기 때문에 이격거리의 증가분에 대한 굴착깊이의 감소비율은 상대적으로 낮은 것으로 분석된다.



Fig. 4. Results of depth (D) according to the standoff distance at (a) HD 55 mm, (b) HD 50 mm, (c) HD 45 mm, and (d) HD 40 mm

Fig. 5는 노즐각(θ)에 따른 굴착깊이(D) 결과를 보여준다. 노즐각이 증가함에 따라 굴착깊이는 전체적으로 소 폭 감소하는 경향을 보였다. 노즐각이 증가함에 따라 젯의 에너지 분포곡선이 중첩되어 감쇄가 발생하는 것으로 분석된다. 또한 노즐각이 증가하면, 대상 표면에 접촉하는 입사 충돌각이 감소하여 굴착효율이 감소할 수 있다 (Momber and Kovacevic, 2012). 동일 이격거리 및 노즐 수평거리 조건에서 노즐각이 증가하였을 때, 측정된 굴 착깊이는 평균 19% 감소하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 현상은 노즐각 1.5°조건(실험에서 최대조건)일 때 각각의 노즐에서 분사된 젯(jet)이 서로 간섭효과를 일으켜 워터젯 운동에너지가 감쇄되는 것으로 분석된다. 노즐 각 1.5°조건에서 낮은 굴착깊이를 보이는 결과는 Fig. 4에서도 대부분 확인된다. 한편 Fig. 4(a)의 경우 노즐 간 수 평거리가 충분히 넓기 때문에 노즐각 1.5°조건에서도 젯의 간섭효과가 크게 발생하지 않았다. 이와 같은 효과로, 동일 이격거리 및 노즐각에서 노즐 간 수평거리(40→55 mm)가 증가할 수록 굴착깊이가 증가하는 경향을 보였다. 한편 노즐각에 의한 젯의 간섭효과는 이격거리 감소에 비례하며 증가하는 경향을 보였다. 이격거리 600 mm 조건의 경우, 노즐각이 0°에서 1.5°로 증가할 때 굴착깊이는 평균 65.5 mm에서 55.1 mm로 15.9 % 감소하였다 (Fig. 5(b)). 이격거리가 600 mm에서 300 mm로 감소되는 경우(Fig. 5(d)), 노즐각의 증가에 따른 굴착깊이의 변 화의 폭이 상대적으로 크며 노즐각 1.5°일 때 특히 굴착깊이가 크게 감소하는 경향을 보였다.



Fig. 5. Results of depth (D) according to the nozzle angle at (a) SOD 750 mm, (b) SOD 600 mm, (c) SOD 450 mm, and (d) SOD 300 mm

굴착깊이 실험결과를 바탕으로 분석하면, 이격거리 및 노즐각이 가장 중요한 변수로 판단된다. 이격거리의 경 우 사용되는 유량이 증가함에 따라 이격거리에 따른 타격에너지 감쇄효과를 상당량 저감시킬 수 있을 것으로 분 석된다. 또한 노즐각의 경우, 본 연구에서 사용된 노즐각이 1.5° 이하로 낮은 수준이기 때문에 직접적으로 굴착깊 이 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 분석된다. 다만 낮은 노즐각이라도 젯의 간섭효과가 발생함을 확인하였고, 이에 따라 노즐각이 증가할수록 굴착깊이가 낮아지는 결과를 보였다. 일정한 노즐각을 가진 두 노즐 시스템에서, 낮은 이격거리 및 좁은 노즐 수평거리는 젯의 간섭효과를 일으킬 확률이 높아질 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

3.2 굴착폭 결과 및 분석

굴착폭은 일반적으로 워터젯의 영향반경의 크기와 밀접한 관련이 있으므로 이격거리에 비례해서 증가한다. 이격거리가 일정한 조건에서 노즐각 증가에 따른 굴착폭 변화는 Fig. 6과 같다. 노즐 삽입을 위해 목표로 하는 기 준 굴착폭을 80 mm로 정의하였다. 기준 굴착폭은 두 개의 워터젯 노즐이 설치된 노즐마운트의 가로폭 길이와 기 존 할암 굴착공법에 활용되던 천공경과 할암봉의 크기를 고려해 결정하였다.



Fig. 6. Results of width (W) according to the nozzle angle at (a) SOD 750 mm, (b) SOD 600 mm, (c) SOD 450 mm, and (d) SOD 300 mm

최대 굴착폭은 노즐각 0.5°, 노즐 간 수평거리 55 mm, 이격거리 750 mm 조건에서 135 mm로 측정되었다. 최 소 굴착폭은 노즐각 0.5°, 노즐 간 수평거리 40 mm, 이격거리 300 mm 조건에서 52 mm로 측정되었다. 굴착폭은 동일한 이격거리에서 노즐 간 수평거리가 증가할수록 증가하였고, 노즐각이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 6). 노즐 간 수평거리가 멀어지면 각각의 노즐이 분사하는 젯의 영향반경 간 거리가 증가하기 때문에 전체 굴착형상의 굴착폭도 증가하는 것으로 분석된다. 한편, 노즐각이 증가하면 각각의 노즐이 분사하는 젯이 상당량 중첩되어 전체 굴착형상의 굴착폭이 감소하는 것으로 분석된다. 이격거리 600, 750 mm 조건에서는 대부분의 실 험조건에서 목표 굴착폭(80 mm) 이상을 굴착하였다. 반면에 이격거리 300 mm와 450 mm 조건에서 생성되는 워 터젯의 영향반경의 범위가 좁기 때문에 다수의 실험조건이 목표 굴착폭을 만족하지 못하였다. 노즐 간 수직거리 가 높은 일부 경우만 낮은 이격거리(300~450 mm) 조건에서 굴착폭을 만족하였다(Fig. 6(c) and 6(d) 참조).

4. 굴착형상에 따른 최적 노즐 운용변수 논의

4.1 굴착형상 평가

연속적인 굴착이 진행되려면 워터젯 노즐이 굴착면 사이로 삽입되어 굴진하면서 유효 이격거리를 유지하는 것 이 매우 중요하다. 따라서 실제 현장에서 워터젯 굴착의 효율성을 파악하려면 굴착깊이(D)뿐 아니라 유효 굴착깊 이(D_e)의 확보가 중요하다. Fig. 7은 굴착형상에 따른 노즐의 굴진가능성과 굴착효율성을 개념도로 나타내었다. Fig. 7(a)는 충분한 폭을 굴착하지 못해 노즐의 삽입이 불가능한 상황이다. 이러한 경우 굴착이 진행됨에 따라 이 격거리가 증가하여 굴착효율이 감소한다. Fig. 7(b)는 노즐의 삽입은 가능하지만 유효 굴착깊이가 충분히 확보되 지 않아 노즐의 굴진이 원활하지 못한 경우에 해당한다. Fig. 8은 굴착깊이에 비해 유효 굴착깊이가 매우 낮은 실 험결과 케이스를 보여준다. 해당 결과는 굴착형상을 점토로 샘플링 한 사진이다.

Fig. 7(c)는 충분한 굴착폭과 유효 굴착깊이를 확보하여 지속적인 노즐의 삽입 및 굴착이 가능한 경우이다. 따라서 굴착형상의 폭과 유효 굴착깊이를 파악하고 효율적인 굴착형상을 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에 서는 형상의 굴착깊이 대비 유효 굴착깊이 정도를 평가하기 위해 잔여율(Remaining rate)을 식 (1)과 같이 정의하였다. 잔여율이 낮을수록 노즐 삽입에 유리하다.

Remaining rate (%) =
$$\frac{D - D_e}{D} \times 100$$
 (1)







Fig. 8. Examples of excavation shapes with low effective depth (D_e) under conditions of (a) and (b)

Fig. 9는 이격거리가 일정한 조건에서 노즐각 증가에 따른 잔여율 변화를 나타낸다. 노즐각이 증가함에 따라 잔 여율은 대체로 감소하는 경향을 보인다. Fig. 9(d)의 경우 노즐각이 0°일 때 모든 노즐 간 수평거리 조건에서 잔여 율이 100%로 측정되었다. 이는 각 노즐의 워터젯 영향반경이 중첩되지 않아, 두개의 노즐에서 생성된 개별적인



Fig. 9. Results of remaining rate according to the nozzle angle at (a) SOD 750 mm, (b) SOD 600 mm, (c) SOD 450 mm, and (d) SOD 300 mm

굴착형상이 형성된 것을 의미한다. 이격거리 750 mm, 노즐 간 수평거리 40 mm 조건에서 노즐각이 증가함에 따 라 잔여율은 48.1%에서 0%까지 감소하였다. 이격거리 600 mm, 노즐 간 수평거리 55 mm 조건에서는 잔여율이 82.1%에서 13.6%까지 감소하였다. 이와 같이 효율적인 굴착형상을 생성하기 위해서는 노즐각이 매우 중요함을 의미한다.

Fig. 10은 노즐간 수평거리 50 mm조건에서, 이격거리 증가에 따른 잔여율 변화를 나타낸다. 이격거리가 증가 할 때 잔여율은 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 노즐각 0°의 경우 이격거리가 증가함에 따라 잔여율은 100% 에서 61%까지 감소하였다. 노즐각 조건 1.5°의 경우 이격거리가 증가함에 따라 잔여율은 60%에서 0%까지 감소 하였다.



Fig. 10. Results of remaining rate according to standoff distance at horizontal distance of 50 mm

Fig. 11은 노즐각 0.5°, 노즐 간 수평리 50 mm조건에서의 이격거리에 따른 굴착형상을 점토로 샘플링한 사진 이다(Fig. 10의 붉은색 영역 조건 샘플). 이격거리 증가에 따라 각 굴착형상의 유효 굴착깊이가 증가하는 것을 시 각적으로 확인이 가능하다. 이격거리가 증가함에 따라 각 노즐이 분사하는 젯의 영향반경이 증가하고, 이로 인하 여 각 노즐의 굴착형상이 충분히 중첩되어 유효 굴착깊이가 확보된 것으로 분석된다.



Fig. 11. Examples of excavation shapes according to the standoff distance (SOD $300 \rightarrow 750$ mm) at nozzle angle of 0.5 and horizontal distance of 50 mm

4.2 최적 노즐 운용변수

본 연구에서는 굴착형상을 3가지로 구분하고, 잔여율이 낮은 형상을 기준으로 최적 노즐운용 변수를 도출하고 자 한다. 굴착형상의 적합성은 기준 굴착폭과 기준 잔여율을 지표로 판단하였다. 기준 굴착폭은 워터젯 노즐의 가 로폭과 할암굴착 시 활용되던 천공경과 할암봉의 크기를 고려하여 80 mm로 결정하였다. 현재 잔여율의 정확한 기준은 없으나 경험적으로 30% 이하면 연속적인 삽입이 가능할 것으로 판단된다. 추후 추가적인 연구를 통해 기 준 잔여율 정립이 필요하다.

본 연구에서 수행한 실험변수 중 굴착폭 80 mm 이상, 잔여율 30% 이하를 충족하는 변수 조합은 Table 4와 같 다. 이격거리 300 mm 및 450 mm 조건은 굴착폭 기준을 충족하지 못하는 것으로 평가되었다. 일반적으로 굴착폭 은 이격거리와 비례하는 경향을 보인다. 따라서 이격거리 300 mm, 450 mm 조건에서 기준 굴착폭을 만족하기 위 해선 워터젯 노즐각을 내부 방향이 아닌 외부 방향으로 설계해야 할 것으로 분석된다. 이격거리가 커질수록 활용 할 수 있는 노즐각과 노즐 간 수평거리의 범위가 증가하였다. 노즐각이 1.5°를 초과하여 설계될 경우 기준폭 확보 를 위해 필요한 이격거리가 과도하게 증가할 우려가 있다.

Standoff distance (mm)	Nozzle angle (°)	Horizontal distance (mm)	Excavation width (W) (mm)	Excavation depth (D) (mm/s)	Excavation volume (V) (mm ³ /s)	Remaining rate (%)
600	1	45	80	2.63	3,437.5	13.6
		50	84	2.67	4,212.5	23.4
	1.5	40	82	2.21	3,183.3	5.7
		45	83	2.13	2,958.3	10.3
750	0.5	40	95	2.42	3,870.8	29.3
	1	40	84	2.33	4,270.8	0
		45	90	2.54	4,283.3	7.4
		50	89	2.5	3,920.8	15.8
		55	94	2.42	4,633.3	24.1
	1.5	40	90	2.17	3,837.5	4.8
		45	86	2.13	3,516.7	12.8
		50	84	2.25	4,520.8	0
		55	84	2.5	4,204.2	4.2

Table 4. Nozzle operating parameters (energy parameter conditions: Water pressure of 182 MPa, water flow rate of 10.7 L/min per nozzle, and abrasive feed rate of 104 g/s per nozzle)

상기 굴착폭 및 잔여율 기준을 만족시키는 노즐 운용변수를 굴착효율을 고려하여 분석하였다. 굴착효율은 총 분사 노출시간 24초로 나누어 초당 굴착깊이 및 굴착부피를 지표로 사용하였다. 굴착깊이 효율 분석결과, Table 4 에서 제시한 실험조건에서 최소 2.13 mm/s가 확보 가능한 것으로 확인되었다. 한편 이격거리 600 mm, 노즐각 1°, 수평거리 50 mm 조건에서 최대 굴착깊이 효율(2.67 mm/s)이 가능함을 확인하였다. 굴착부피 효율 분석결과, 이격거리 750 mm, 노즐각 1°, 수평거리 55 mm 조건에서 최대 굴착부피 효율(4,633.3 mm³/s)이 가능함을 확인하 였다.

5. 결 론

암반 천공에 있어 기존 천공공법의 단점을 보완하고 분진 방지, 소음 저하 등의 친환경적인 이점을 확보하기 위 해 워터젯 공법의 활용이 증가하고 있다. 워터젯 공법의 효율을 극대화하기 위해 현장 적용 시 복수의 노즐을 이 용한 삽입 및 굴진이 필수적이다. 복수의 노즐을 사용할 경우 노즐의 운용방법에 따라 굴착성능과 형상을 분석하 여야 한다. 본 연구에서는, 두 개의 연마재 워터젯 노즐을 활용하여 노즐 운용변수에 따른 굴착성능과 형상을 화 강암을 대상으로 실험을 수행하였다. 또한, 잔여율 개념을 정의하여 굴착성능 및 형상을 분석하고 최적 노즐 운용 변수를 제안하였다. 주요한 결과는 아래와 같다.

- 노즐각이 증가할 때 굴착깊이와 굴착폭은 대체로 감소하는 경향을 보인다. 잔여율은 노즐각이 증가할 때 크게 감소하였다. 노즐 간 수평거리가 증가할 때 굴착폭이 약간 증가하는 경향을 보였으나 민감도는 높지 않았다. 이격거리가 증가할 때 굴착깊이는 감소하고 굴착폭은 증가하는 경향을 보였다. 또한 잔여율도 감소하는 경향 을 보였다. 본 연구에서 실험한 세 가지 노즐 운용변수 중 굴착성능과 형상에 주요한 인자는 젯이 중첩되는 조 건에서 노즐각과 이격거리로 평가되었다.
- 효율적인 굴착형상을 워터젯 노즐의 가로폭을 고려해 굴착폭 80 mm 이상, 유효 굴착깊이의 형성정도를 고려 해 잔여율 30% 이하로 정의하였다. 실험결과를 토대로 도출한 노즐 운용변수는, 이격거리 600~750 mm 범위, 노즐각 1~1.5° 그리고 노즐 간 수평거리 45~50 mm범위로 제안되었다.
- 굴착효율을 고려한 최적 운용변수는 다음과 같다. 최대 굴착깊이 효율(2.67 mm/s)은 이격거리 600 mm, 노즐 각 1°, 수평거리 50 mm 조건에서 가능하다. 최대 굴착부피 효율(4,633.3 mm³/s)은 이격거리 750 mm, 노즐각 1°, 수평거리 55 mm 조건에서 가능하다.
- 4. 추후 노즐각이 1.5°를 초과하여 설계될 경우 기준 굴착폭 확보를 위해 요구되는 이격거리가 과도하게 증가하 므로 굴착속도가 감소할 것으로 분석된다. 이격거리 300, 450 mm 조건에서는 기준 굴착폭 확보를 위해 노즐 각을 내부 방향이 아닌 외부 방향으로 설계해야 할 것으로 판단된다.
- 5. 본 연구에서는 고정된 수직 마운트를 활용하여 천공모사 굴착실험을 진행하였다. 따라서 실제 굴진이 이루어 지는 워터젯 굴착공법에 대해 동일하게 모사하지 못한 한계점이 존재한다. 그러나 본 연구결과는 복수의 워터 젯 노즐 활용 시 발생하는 운용변수에 따른 굴착효율 및 형상 변화를 파악한 기초 연구로 향후 암반 천공용 다 중 워터젯 노즐 설계 시 유용한 기초연구로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C164123-01).

저자 기여도

박준식은 실험계획 및 수행, 실험데이터 수집, 연구결과 분석, 논문원고 작성을 하였고, 차현종은 실험계획 및 수행, 실험데이터 수집을 하였고, 홍은수는 연구개념 수립, 연구개념 계획을 하였고, 전형우는 연구개념 계획, 실 험설계를 하였고, 오태민은 연구개념 설계, 실험계획 및 수행, 연구결과 분석, 원고검토를 하였다.

References

- 1. Anwar, S. (2013), Modelling of abrasive waterjet milled footprints, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, pp. 1-6.
- Kim, J.G., Park, T.D. (2003), "A study on the driving performance of the microtunneling machine with a rotating water jet cutterhead", Korea Institute of Information and Telecommunication Facilities Engineering, pp. 367-372.
- 3. Liu, S., Li, H., Chang, H. (2017), "Drilling performance of rock drill by high-pressure water jet under different configuration modes", Shock and Vibration, Vol. 2017, pp. 1-14.
- 4. Lu, Y., Tang, J., Ge, Z., Xia, B., Liu, Y. (2013), "Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 60, pp. 47-56.
- 5. Momber, A.W. (2016), "The response of geo-materials to high-speed liquid drop impact", International Journal of Impact Engineering, Vol. 89, pp. 83-101.
- 6. Momber, A.W., Kovacevic, R. (2012), "Principles of abrasive water jet machining", Springer Science & Business Media, pp. 89-162.
- 7. Nakano, K., Okada, S., Furukawa, K., Nakagawa, K. (1993), "Vibration and cracking of tunnel lining due to adjacent blasting", Doboku Gakkai Ronbunshu, Vol. 1993, No. 462, pp. 53-62.
- Oh, T.M., Cho, G.C. (2012), "Effects of geometric parameters of a combined nozzle for rock cutting using an abrasive waterjet", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 5, pp. 517-528.
- 9. Oh, T.M., Cho, G.C. (2016), "Rock cutting depth model based on kinetic energy of abrasive waterjet", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 49, No. 3, pp. 1059-1072.
- 10. Oh, T.M., Cho, G.C., Song, K.I., Ji, I.T. (2012), "A new rock excavation method with an abrasive waterjet to minimized excavation damaged zone", World Tunnel Congress WTC, pp. 340-341.
- Oh, T.M., Park, D.Y., Park, J.S., Cho, G.C. (2021), "Analysis of rock removal shape according to overlapping width of waterjet cutting", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 23, No. 3, pp. 167-181.

- Perrott, C.M. (1979), "Tool materials for drilling and mining", Annual Review of Materials Science, Vol. 9, No. 1, pp. 23-50.
- 13. Plinninger, R.J. (2008), "Abrasiveness assessment for hard rock drilling", Geomechanik und Tunnelbau, Vol. 1, No. 1, pp. 38-46.
- 14. Ren, F., Fang, T., Cheng, X. (2020), "Study on rock damage and failure depth under particle water-jet coupling impact", International Journal of Impact Engineering, Vol. 139, 103504.
- Shin, J.H., Choi, G.C., Moon, H.K., Kim, T.G. (2009), "Evaluation of the blast-restriction zone to secure tunnel lining safety", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 1, pp. 85-95.