

超高壓水에 의한 花崗石切削에 대한 研究

鮮于椿 · 崔炳熙 · 柳暢夏

A study on the slot cutting in granite by high speed water jet

Choon Sunwoo, Byung-hee Choi and Chang-ha Ryu

ABSTRACT

Water jet has been employed in the extraction of minerals for many years but the applications of low pressure jets are confined to some fields. With increasing strength of equipment it is possible to consider the use of high speed water jets for cutting hard rock. The high speed water jet technology is applied to various engineering fields such as processing rocks, quarrying rocks, mechanical excavation or rock drilling for underground construction, pre-cracking around a bore hole for hydraulic fracturing as well as rock excavation under the sea. For slot cutting in rocks with high speed water jets it is necessary to establish the empirical formula for estimation of the cutting depth. The cutting depth is influenced by cutting parameters such as driving pressure, traverse speed, standoff distance, and shape and diameter of nozzle. Tests were carried out with a variety of cutting parameters on three types of granite. Nozzle pressures ranged from 1,400 to 2,800 bar, traverse speeds from 0.45 to 10.38 cm/min, standoff distances from 4.5 to 13.5 mm, and three types of nozzle diameter were used.

1. 서 론

water jet를 이용하여 암석을 절삭하는데 있어서 절삭성능에 영향을 주는 요소는 절삭대상암석이 지니고 있는 물리적 성질 이외에도 장비의 성질 즉 노즐의 형상과 구경, 분사각도, 토출압력(吐出壓力), 노즐의 이송속도 및 이격거리(standoff distance: 암석과 노즐사이의 간격)등을 고려할 수 있다. water jet에 의한 절삭기술을 여러 적용분야에서 실용화하려면 장비의 선택이나 경제성 평가등이 필요하며 이를 위해서는 절삭조건이나 피절삭물의 성질들이 절삭성능 요소에 어떠한 영향을 미치는 가를 밝혀야 할 필요가 있다. water jet에 의한 절삭성능을 나타내는 지표로 사용될 수 있는 요소들로서는 절삭심도, 절삭폭, 절삭체적 또는 단위 절삭체적당 에너지 소비 등을 생

각할 수 있지만 이러한 요소 중에서도 절삭심도의 측정이 간편하고 이것에 대한 예상치를 유도하는 것이 가장 중요하다고 생각된다. 따라서 본 절삭시험은 이 절삭심도를 초점으로 하여 이루어졌다.

절삭심도에 대한 실험식^{1,3)}과 이론식^{4,6)}이 발표되고 있지만 실험식은 광범위한 조건에 적용하는 것이 어려운 경우가 많으며, 또한 이론식은 실험결과를 설명하기에는 부적당한 경우가 많이 있다. 따라서 작업의 대상이 되는 시료에 대한 실험이 선행되어야 할 것이다.

본 실험은 3종류의 화강석을 대상으로 실험이 이루어 졌고 앞으로 CAD와 CAM을 이용한 석재의 정밀가공 및 채석의 기계화 그리고 암반굴착에 필요한 기초자료가 될 수 있을 것이다.

* 1994년 7월 7일 접수

2. 시험장비 및 시험방법

Fig. 1과 2는 Water jet 장비의 설치 사진과 nozzle holder를 제어하는 실험장치를 나타내는 도면과 사진이다. 이 시험장비는 100 Hp의 전기 모터를 사용하는 water jet 장비로 최대토출압력이 약 3800 bar이며, 최대압력에서 7.5l/min의 물이 소모되는 미국 Flow 사 제품이다.

장비중 가장 중요한 부품인 증폭기(intensifier)는 유압으로 작동되어 water jet 장비에 초고압수를 공급하는 일종의 복동식 피스톤 펌프이다. 이것은 고압수를 생산하기 위해 유압유(Hydraulic oil)를 압축



Fig. 1. water jet used for the tests.

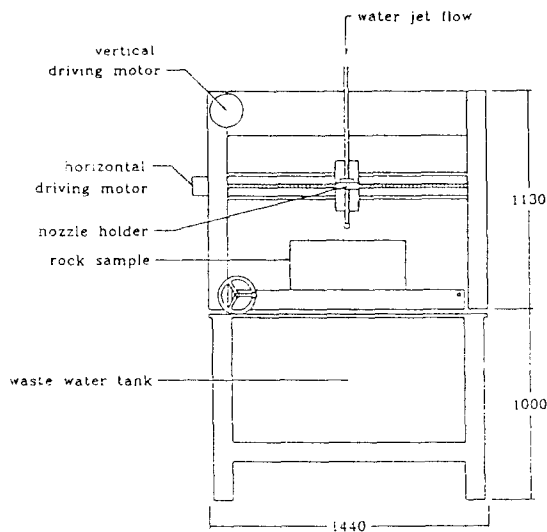


Fig. 2. Nozzle holder controller.

하는 기능을 가지며 Fig. 3처럼 피스톤에 작용하는 hydraulic oil의 압력은 피스톤에 부착되어 있는 plunger에 힘을 가해 줌으로써 고압수 실린더에 더 큰 힘을 가해주게 된다. 고압수 실린더의 압력은 유압 오일(P_{oil})의 압력에 비례하고 다음의 1)식에 의해 물의 압력(P_{water})이 계산될 수 있다.

$$P_{water} = P_{oil} \times \frac{A_{piston} - A_{plunger}}{A_{plunger}} \quad (1)$$

여기서 P : 압력, A : 단면적

$(A_{piston} - A_{plunger})/A_{plunger}$ 는 압력증폭비(pressure intensification ratio)를 나타낸다. 이 증폭비의 값은 어떤 주어진 증폭기에 있어서는 일정하기 때문에 수압은 유압유의 압력을 조절함으로써 조절할 수 있다.

고압수는 고압펌프에서 고압호스를 통해 nozzle holder에 부착된 노즐을 통하여 암석시료면에 분사된다. nozzle holder를 제어하는 장치는 노즐에서 분사되는 고압수를 평행으로 그리고 정속으로 이동시킬 수 있도록 123 mm/min까지 무단 변속시킬 수 있다. 최대 절삭 가능길이는 800 mm 정도이고 또한 한번 수평절삭 후에는 이격거리를 자동조절할 수 있으며 수직 이동가능 길이는 600 mm로 설계되어 있다.

시험대상인 3종류의 화강석은 중립질의 신복석, 조립질의 문경석, 세립질의 제천석을 사용하였으며, 장비의 시험요소로서는 3종류의 노즐구경(0.45 mm, 0.3 mm, 0.25 mm)을 이용하여 토출압력, 노즐의 이송속도 및 이격거리를 변화를 시키면서 절삭심도를 예측할 수 있는 실험식을 구하기 위한 실험을 실시하였다. 시험에 사용한 시료의 크기는 15 cm×30 cm×60 cm의 각주로 성형된 것을 사용하였다.

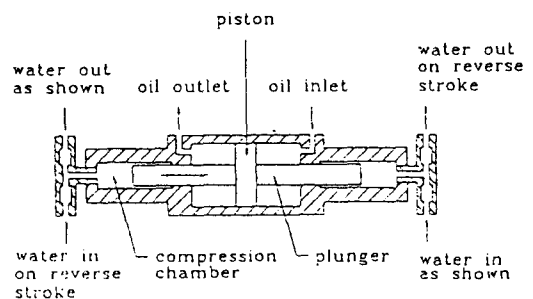


Fig. 3. Intensifier.

시험은 노즐구경의 변화에 따른 시험을 제외하고는 구경이 0.45 mm인 것을 주로 사용하였으며,

- 토출압력의 변화는 2800, 2520, 2100, 1820 그리고 1400 bar의 5단계에 대한 실험을 실시하였고,

- 노즐의 이송속도의 변화는 0.45, 0.98, 1.92, 2.86 그리고 3.80 cm/min의 5단계에 대한 실험을 하였고 보다 빠른 이송속도에 대한 시험을 위해 8.5, 10.38 cm/min의 2단계에 대해서도 실험을 실시하였다.

- 이격거리는 4.5, 6.75, 9, 11.25, 그리고 13.5 mm의 5단계 즉 노즐구경에 대한 이격거리의 비가 10에서 30배까지의 5단계와 암석을 절삭할 수 있는 최대 높이까지 시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 고찰

본 논문은 물의 압력변화와 노즐의 이송속도변화를 중심으로 하여 시험결과를 분석하였다.

3.1 물의 토출압력

Fig. 4는 3종류의 화강석에 대한 0.45 mm 구경과 0.25 mm 구경의 노즐에서 토출압력의 증가에 따른 절삭심도를 암석별로 나타낸 것으로 제천석(J.C.)이 가장 절삭심도가 크고, 신북석(S.B.)이 절삭심도가 가장 낮게 나타나고 있다. 토출압력이 증가함에 따라 절삭심도는 거의 직선적으로 증가한다. 노즐의 구경이 적을 때에는 절삭심도에서 큰 차이를 보이지 않지만 노즐의 구경이 커짐에 따라 압력에 따른 절삭심도의 증가율도 커짐을 알 수 있다. 여기서 노즐의 구경이 약 2배 증가됨에 따라 절삭심도는 2~2.5배 정도 증

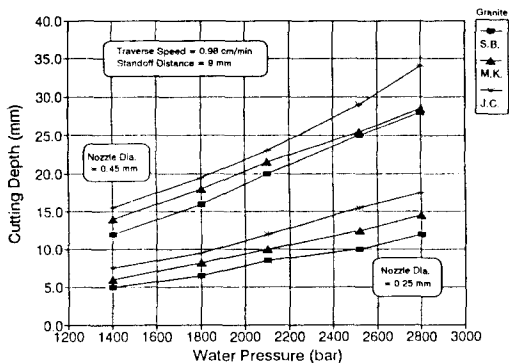


Fig. 4. Driving pressure vs. cutting depth for 3 granites with nozzle diameter as parameter.

가되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 3종류의 화강석시료에 대한 절삭심도와, 토출압력의 관계를 노즐구경 0.45 mm인 경우에서 노즐의 이송속도를 변수로 하여 얻어진 시험결과를 나타낸 것이다. 모든 시료에서 토출압력이 증가함에

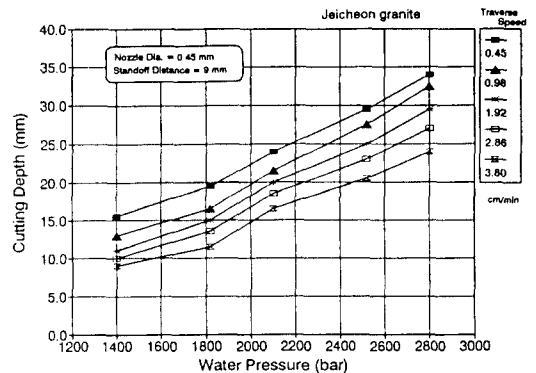
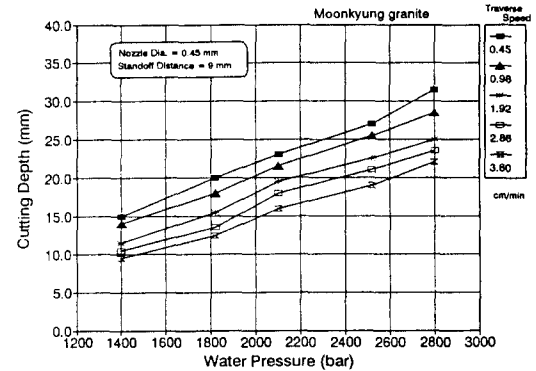
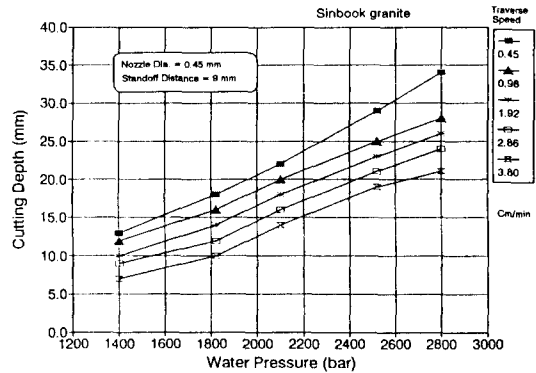


Fig. 5. Driving pressure vs. cutting depth with traverse speed as parameter.

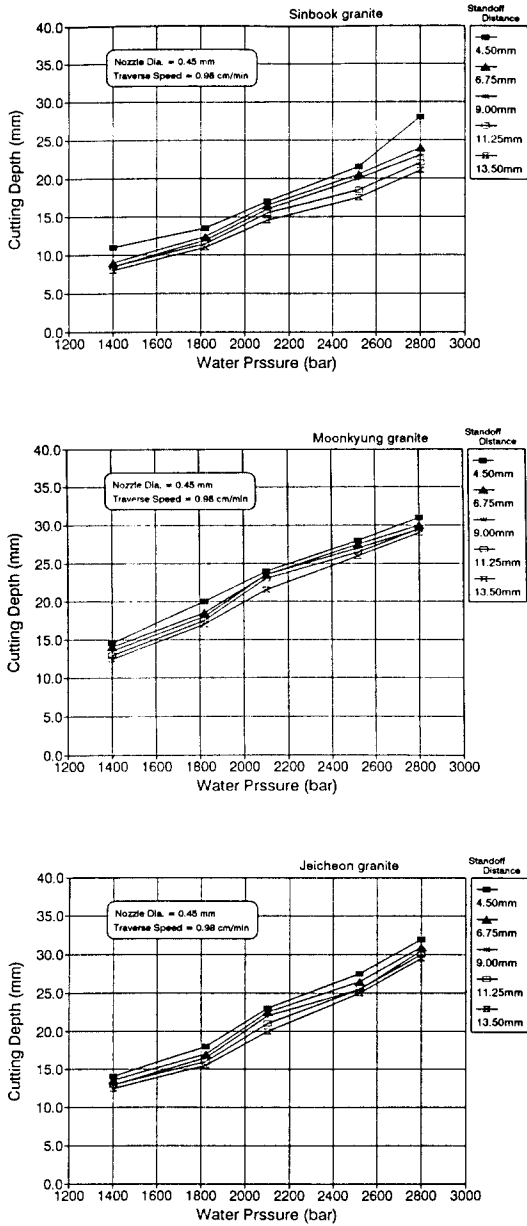


Fig. 6. Driving pressure vs. cutting depth with standoff distance as parameter.

따라 절삭심도는 거의 직선적으로 증가하며, 또한 이송속도의 증가에 따라 반비례하는 것을 볼 수 있다. 그러나 1800 bar 이하의 압력에서 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 압력이 낮을 때 절삭면에서 chipping과 같은 현상이 일어나는 것에 의해 영향을

Table 1. Critical pressure (P_c), coefficient k_{ts} and correlation coefficient for 3 granites with traverse speed as parameter.

Rocks	Traverse speed (cm/min)	k_{ts}	P_c (bar)	R^2
Sinbook granite	0.45	0.0151	592	0.993
	0.98	0.0127	400	0.997
	1.92	0.0117	571	0.997
	2.86	0.0111	651	0.990
	3.80	0.0106	783	0.988
	8.50	0.0094	914	0.995
	10.38	0.0088	924	0.981
Moonkyung granite	0.45	0.0114	84	0.994
	0.98	0.0104	62	0.998
	1.92	0.0097	188	0.989
	2.86	0.0095	311	0.984
	3.80	0.0089	363	0.993
	8.50	0.0078	392	0.998
	10.38	0.0081	562	0.989
Jeicheon granite	0.45	0.0145	468	0.992
	0.98	0.0160	779	0.985
	1.92	0.0143	749	0.992
	2.86	0.0133	769	0.990
	3.80	0.0123	831	0.981
	8.50	0.0116	1080	0.991
	10.38	0.0108	1069	0.982

받은 것으로 생각할 수 있다.

Fig.6은 각 시료에 대한 절삭심도와 토출압력의 관계를 standoff distance에 대하여 나타낸 것으로, 절삭심도는 토출압력이 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하며, standoff distance의 증가에 따라서는 반비례하나, standoff distance의 차에 따른 변화는 크지 않은 것을 볼 수 있다.

압력의 증가에 따른 절삭심도의 변화를 살펴보면 모든 시료에서 standoff distance의 변화에 따른 절삭심도의 영향이 가장 적게 나타나고 이송속도와 노즐의 구경에 대해서는 변화가 보다 크게 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 보다 큰 절삭심도를 얻기 위해서는 standoff distance를 변화시키는 것보다는 이송속도를 변화시키는 것이 효과적일 수 있다는 것을 알 수 있다.

각 도표에서 나타나는 직선의 연장선과 토출압력인

X축과의 교점에서 나타나는 압력은 암석절삭이 가능한 하한 吐出壓力으로 나타낼 수 있다. 이 하한 토출압력을 P_c 로 표시하면 절삭심도(h_{cut})를 구하는 식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$h_{cut} = k(P - P_c) \quad (2)$$

여기서 상수 k 는 각 절삭조건에 따라 이송속도(k_{is}), standoff distance(k_{sd}), 노즐구경(k_{nd})에 의존하는 계수이다. 각 계수의 값은 regression을 통하여 구할 수 있다.

이와 같이 이송속도에 따른 하한 토출압력의 경우는 계산에 의하면 암석종류에 따라 Table 1처럼 신북석이 평균 690 bar, 문경석이 280 bar, 제천석이 820 bar 정도의 하한 토출압력을 나타내며, 3종류의 암석중에서 문경석이 가장 낮은 수압에서 암석절삭이 가능한 것으로 나타나고 있다. 또한 3종류의 암석 모두에서 이송속도가 빨라짐에 따라 암석을 절삭할 수 있는 하한 토출압력도 커져야 됨을 알 수 있다. 또한 k_c 의 경우도 3암종 모두에서 이송속도가 빨라짐에 따라 직선의 기울기 값이 적어지는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 같은 토출압력의 변화에서 이송속도가 빨라지면 절삭심도의 증가율이 감소되는 것을 의미한다.

standoff distance에 따른 압력변화와 절삭심도관계에서 하한 토출압력의 경우는 계산에 의하면 Table 2처럼 신북석이 평균 590 bar, 제천석이 400 bar, 문경석이 240 bar 정도의 하한 토출압력을 나타내며 제천석의 경우는 이송속도의 경우와 다른 경향을 나타내고 있다. 여기에서도 3종류의 암석중에서 문경석이 가장 낮은 수압에서 암석절삭이 가능한 것으로 나타나고 있다. 또한 모든 시료에서 standoff distance가 커짐에 따라 암석을 절삭할 수 있는 하한 토출압력도 커지고 있으나, 이송속도의 경우와는 달리 k_{sd} 의 값의 변화는 3암종 모두에서 standoff distance의 높이가 커져도 직선의 기울기 값의 변화가 적은데 이것은 standoff distance에 의한 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

전체적으로 토출압력의 증가에 따른 절삭심도의 변화를 살펴보면 모든 시료에서 standoff distance의 변화에 따른 절삭심도의 영향이 가장 적게 나타나고, 이송속도와 노즐의 구경에 대해서는 변화가 보다 크게 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 보다 큰 절삭심도를 얻기 위해서는 standoff distance를 변화시

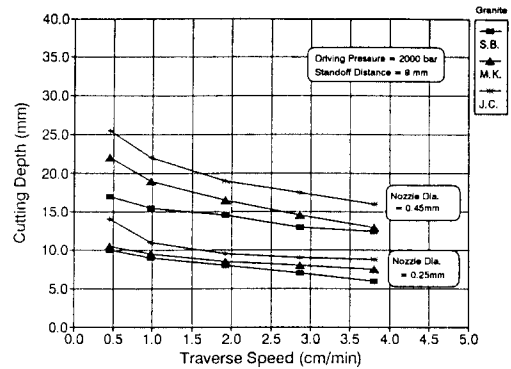


Fig. 7. Traverse speed vs. cutting depth for 3 granites with nozzle diameter as parameter.

Table 2. Critical pressure(P_c) and coefficient k_{sd} with standoff distance as parameter.

Rocks	standoff distance (mm)	k_{sd}	P_c (bar)
Sinbook granite	4.5	0.01186	594
	6.75	0.01081	600
	9.0	0.01053	618
	11.25	0.00964	552
	13.5	0.00922	567
Moonkyung granite	4.5	0.01172	122
	6.75	0.01169	186
	9.0	0.01168	219
	11.25	0.01195	296
	13.5	0.01197	358
Jeicheon granite	4.5	0.01292	356
	6.75	0.01261	376
	9.0	0.01245	402
	11.25	0.01232	417
	13.5	0.01234	467

키는 것보다는 이송속도를 변화시키는 것이 효과적인 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 노즐의 移送速度

Fig. 7은 3종류의 화강석에 대한 0.45 mm와 0.25 mm 구경의 노즐에서 이송속도의 증가에 따른 절삭심도를 암석별로 나타낸 것이다. 여기서 이송속도가 빨라짐에 따라 절삭심도가 감소되고 있으나 절삭심

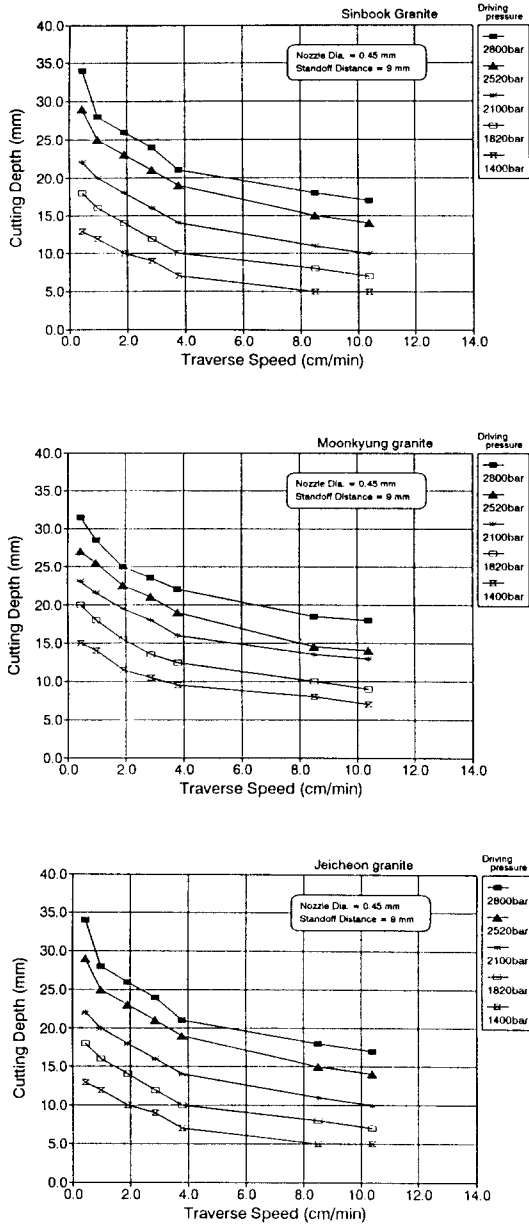


Fig. 8. Traverse speed vs. cutting depth with driving pressure as parameter.

도의 감소율이 직선적으로 변화되지 않고 있으며, 낮은 이송속도 부분에서는 감소율이 높고 이송속도가 높아질수록 절삭심도의 감소율이 둔화되고 있음을 볼 수 있다. 노즐구경이 0.25 mm에서 0.45 mm로 증가

됨에 따라 절삭심도에서 1.5에서 2배 정도의 차이를 나타내고 있다. 또한 이상의 시험조건에서도 제천석(J.C)이 절삭심도가 가장 크고 신복석(S.B)이 절삭심도가 가장 낮게 나타나고 있다.

Fig. 8은 노즐구경 0.45 mm, standoff distance 9 mm를 고정 시험조건으로 하고 압력의 변화에 따른 3종류의 화강석 시료에 대한 이송속도와 절삭심도의 관계를 나타낸 것이다. 이송속도가 빨라짐에 따라 절삭심도가 감소되나 절삭심도의 감소율이 직선적으로 변화되지 않으며, 낮은 이송속도 부분에서는 감소율이 높고 이송속도가 높아질수록 절삭심도의 감소율이 둔화되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 한쪽의 값을 대수값으로 취하면 직선의 형태를 보일 수 있다는 것을 알 수 있다. 각 이송속도에서 절삭심도의 크기는 토출압력의 증가에 따라 증가되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 노즐구경 0.45 mm, 토출압력 2000 bar를 고정 시험조건으로 하고 standoff distance의 변화에 따른 3종류의 화강석시료에 대한 이송속도와 절삭심도의 관계를 나타낸 것이다. 이 시험조건에서도 압력의 변화의 경우와 마찬가지로 이송속도가 빨라짐에 따라 절삭심도가 감소되나 절삭심도의 감소율이 직선적으로 변화되지 않으며, 낮은 이송속도부분에서는 절삭심도의 감소율이 높고 이송속도가 높은 부분에서는 절삭심도의 감소율이 둔화되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 다른 이송속도에 있어서 standoff distance의 변화에 따른 절삭심도의 변화는 압력의 변화만큼 크지 않음을 볼 수 있다.

이송속도의 변화에 따른 절삭심도의 관계는 모든 시험조건하에서 정도의 차이는 있지만, 속도가 빨라짐에 따라 절삭심도가 감소되나 낮은 이송속도부분에서는 절삭심도의 감소율이 높고, 이송속도가 빨라질수록 절삭심도의 감소율이 둔화되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 이송속도의 값을 Log를 취하면 절삭심도와 이송속도의 관계가 직선적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 Log 값을 취한 형태가 Fig. 10이며, 이것은 3종의 암석중 문경석에 대한 압력의 변화에 따른 이송속도와 절삭심도와의 관계를 나타낸 것이며, 다른 두 암종에서도 이와 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 11은 3종의 화강석에서 상수 K_{ts} 와 노즐의 이송속도와의 관계를 Log-Log 그래프로 나타낸 것으로

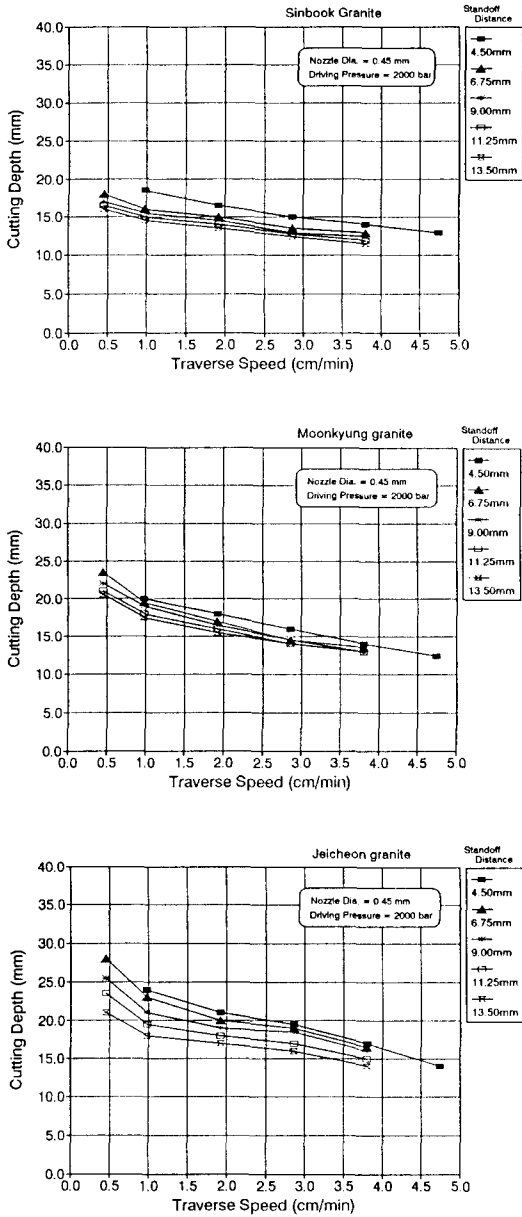


Fig. 9. Traverse speed vs. cutting depth with stand-off distance as parameter.

두 요소의 관계가 거의 직선적이기 때문에 K_{ts} 는 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$k_{ts} = C V^{-n} \tag{3}$$

여기서 V 는 이송속도이고 n 과 C 는 암석에 따른

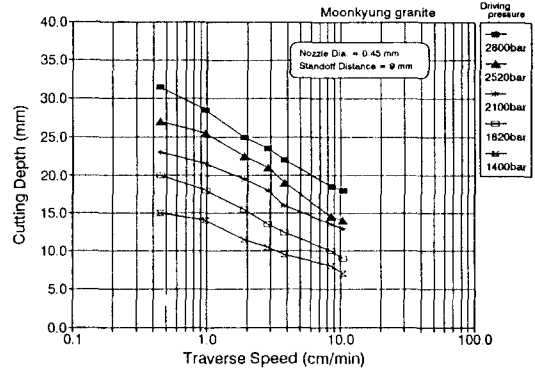


Fig. 10. Traverse speed(Log) vs. cutting depth for Moonkyung granite with driving pressure as parameter.

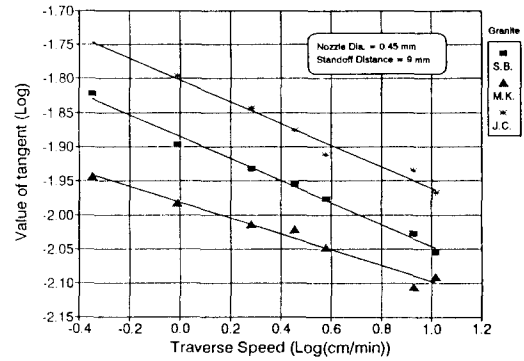


Fig. 11. The relation between traverse speed and coefficient k_{tc} for 3 granites.

Table 3. Average critical pressure (P_c) and constant C and n for 3 granites.

Rocks	C(mm/bar)	P_c (bar)	n
Sinbook granite	0.0130	690	-0.16126
Moonkyung granite	0.0104	280	-0.11636
Jeicheon granite	0.0158	820	-0.15958

상수로서 (3)식을 (2)에 대입하면 (4)와 같이 되며,

$$h_{cut} = C V^{-n} (P - P_c) \tag{4}$$

암석의 하한 토출압력을 알 경우에 (4)식에 의해서 토출압력과 이송속도에 따른 절삭심도의 예상치를 계산할 수 있다.

Table 3는 각 화강석의 평균 하한 토출압력과 상수

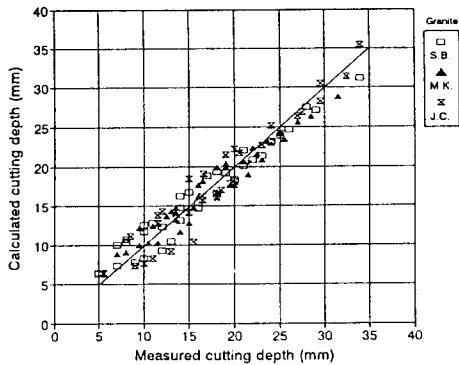


Fig. 12. Comparison of cutting depth of experiment and calculation with variation of the driving pressure and traverse speed.

Table 4. Physical properties of tested rocks.

	Sinbook granite	Moonkyung granite	Jeicheon granite
density (g/cm ³)	2.59	2.56	2.65
compressive strength (kg/cm ²)	1,335	950	1,143
tensile strength (kg/cm ²)	100	73	123
absorption ratio (%)	0.33	0.46	0.27
Shore hardness	74.2	70.8	71.5

A와 n의 값을 나타내는 도표이다.

Fig. 12는 3종의 화강석에 대한 절삭심도를 실험식 (4)에 의해 계산된 예상절삭심도와 실측치와의 관계를 나타낸 것이며, R²=0.96로 상관관계가 매우 높기 때문에 본 시험 범위 내에서 (4)식으로 절삭심도의 예상치를 계산한다는 것이 매우 타당성이 있음을 나타내고 있다.

3.3 암석물성과의 관계

시험대상 화강석의 암석물성은 Table 4에 표시된 것과 같으며, 세립질인 제천석이 비중이 2.65, 흡수율이 0.27%로 가장 치밀하며, 조립질인 문경석이 비중 2.56로 가장 낮고, 흡수율은 0.46%로 가장 높은 값으로

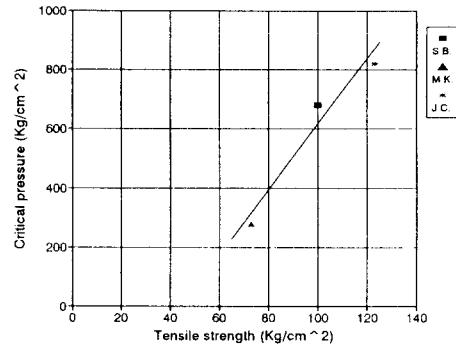


Fig. 13. The relation between tensile strength and critical pressure.

공극이 많은 것으로 나타나고 있다. 압축강도는 신북석이 1,335 kg/cm²로 가장 높고, 그리고 제천석, 문경석 순이며, 인장강도는 제천석이 123 kg/cm²로 가장 높고 신북석이 100 kg/cm², 문경석이 73 kg/cm²의 값을 나타내고 있다. Shore 경도는 신북석 74, 문경석 73, 그리고 제천석이 72로 별 차이를 보이지 않고 있다.

초고압수에 의한 절삭에서 있어서 화강석의 절삭 가능 하한토출압력은 제천석이 가장 높고, 다음이 신북석 그리고 문경석 가장 낮게 나타나고 있는 것을 볼 때, 암석물성요소중 하한토출압력에 대한 인장강도는 비교적 직선선적인 상관관계를 보이지만(Fig. 13 참조), 압축강도, 비중, Shore 경도등 다른 암석물성요소와의 상관관계를 찾기가 힘들다. 이와 같이 일반적으로 생각하는 압축강도는 암석의 절삭성을 나타내는 지표로서는 부적당하다. Okumura 등²⁾은 초고압수에 의한 암석절삭은 시료내에서 일어나는 미시적인 인장응력에 의한 파괴가 직접적으로 관여하는 것으로 유추하고 있다. 이와 같이 초고압수에 의한 절삭기구는 단순하지 않으며 여러가지의 기구가 복합적으로 작용한다고 생각된다. 특히 암석의 입자구성 성분 및 구조, 결합상태등과 파괴기구와의 관계를 밝히는 것이 필요할 것이다. 따라서 보다 많은 암종에 대한 시험과 또한 광물성분의 영향에 대한 조사가 이루어져야 할 것으로 본다.

초고압수와 시료의 충돌면을 살펴보면 토출압력이 높거나 노즐의 이송속도가 느린 경우에는 시료표면의 절삭홈 부분에는 균열이 생기지 않고 절삭홈이 일정한 것을 관찰(Fig. 14(A))할 수 있다. 그러나 낮은 압력

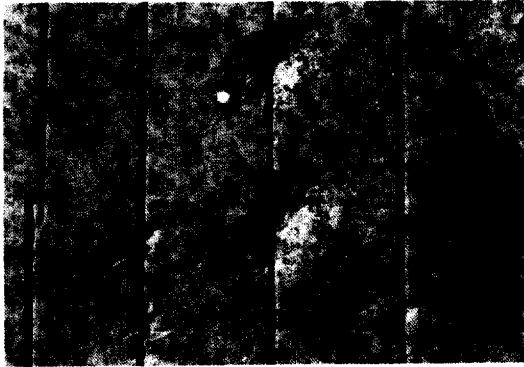


Fig. 14. The slotting surface for Sinbook granite by high speed water jet.

에서 노즐의 이송속도가 빨라지면 절삭흡부근에 crater(Fig. 14(B))와 같은 모양의 파괴현상이 발달되는 것을 관찰할 수 있고, 이송속도가 더욱 빨라지거나 standoff distance의 높이가 높아지는 경우에는 노즐의 이동방향으로 고기비를 같은 균열(Fig. 14(C) and (D))이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. Okumura 등²⁾은 이러한 현상은 토출압력이 작아서 고압수의 절삭력이 떨어지고 노즐의 이송속도가 크기 때문에 절삭력이 작용하는 시간이 충분히 적어서 절삭흡을 형성하는데 필요한 미세적인 파괴(절삭)가 일어나기 전에 고압수의 충돌력이 강체의 썩기를 주입하는 효과를 가져와서 chipping 현상이 일어난다고 해석하고 있다. 즉 chipping은 암석층의 어느 범위에 걸쳐서 생긴 응력에 의해 생기는 데 반해 초고압수의 절삭은 암석의 극히 미세적인 부분의 파괴에 관여한다고 생각할 수 있다고 했다. 이와 같은 것을 고려하면 인장강도가 적은 암석의 경우는 초고압수에 의해 절삭흡 형성에 관여하는 미세파괴가 일어나기 쉬운데 반해서 인장강도가 큰 암석에서는 절삭흡 형성에 관여하는 미세파괴가 일어나기 어렵기 때문에 고기비들과 같은 모양의 chipping 현상이 일어나기 쉽다고 이해할 수 있다.

절삭시료의 절삭흡의 수직단면을 관찰하면 초고압수가 충돌하는 시작부분은 다소 매끄러운 반면에 심도가 깊어짐에 따라 수류가 배출되는 방향으로 굽어진 줄무늬를 관찰할 수 있는데 이것은 강한 입자나 조직이 강한 부분을 피해서 절삭이 일어나고 있기 때문이다. 바닥부분에서는 공동과 같은 모양들이 다수 관찰되고 있는데 이 부분은 초고압수의 직접적인 영

향보다는 떨어져 나온 입자에 의한 타격으로 생각된다.

4. 결 론

여러가지의 시험조건 즉 nozzle의 구경, 토출압력, 노즐의 이송속도 및 standoff distance의 변화가 절삭심도에 미치는 영향을 요약하면 다음과 같다.

1) 전체적으로 모든 시험의 조건에서 토출압력의 증가에 따라서 절삭심도는 비례하여 증가하며, 이러한 시험조건들 중에서 standoff distance의 변화에 따른 절삭심도의 영향이 가장 적게 나타나고 이송속도와 노즐구경의 변화에 대해서는 보다 큰 변화가 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 보다 큰 절삭심도를 얻기 위해서는 standoff distance를 변화시키는 것보다는 이송속도를 변화시키는 것이 효과적일 수 있다.

2) 이송속도의 변화에 따른 절삭심도의 관계는 모든 시험조건하에서 정도의 차이는 있지만, 속도가 빨라짐에 따라 절삭심도가 감소되거나 낮은 이송속도부분에서는 절삭심도의 감소율이 높고, 이송속도가 빨라질수록 절삭심도의 감소율이 둔화되고 있음을 볼 수 있다.

3) 토출압력과 이송속도에 따른 절삭심도의 예상치를 계산할 수 있는 식은 다음과 같다.

$$h_{cut} = C V^n (P - P_c)$$

3종의 화강석에 대해 상기 실험식에 의해 계산된 값과 실측치의 관계는 상관관계가 $R^2=0.96$ 로 매우 높기 때문에 본 시험범위내에서 상기 실험식으로 절삭심도의 예상치를 계산할 수 있다.

4) 절삭심도와 암석물성과의 관계에 있어서 화강석시료에서 하한토출압력과 인장강도는 비교적 직선적인 상관관계를 보이지만, 그외의 암석물성요소인 압축강도, 비중, Shore 경도등과의 상관관계를 인정하기가 힘들다. 이와 같이 일반적으로 생각하는 압축강도는 암석의 절삭성을 나타내는 지표로서는 부적당하다.

참 고 문 헌

- 1) Harris, H.D. & Mellor, M. (1974), Cutting rock with water jets, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.,

- Vol. 11, pp. 343-358.
- 2) Okumura, K. et al. (1990), The effects of driving pressure and traverse rate on depth of cut for slot cutting in rocks with high-speed waterjets, 日本資源素材學會誌, Vol. 106, No. 1, pp. 13-19.
 - 3) Matsuki, K., Suzuki, K. & Okumura, K. (1990), An empirical formula on the depth of cut for slotting in rocks with high-speed waterjets, 日本資源素材學會誌, Vol. 106, No. 2, pp. 55-59.
 - 4) Crow, S.C. (1973), A theory of hydraulic rock cutting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 10, pp. 567-584.
 - 5) Hurburt, G.H., Crow, S.C. & Lade, P.V. (1975), Experiments in hydraulic rock cutting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 12, pp. 203-212.
 - 6) Crow, S.C. (1974), The effect of proosity on hydraulic rock cutting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 11, pp. 103-105.