

장비운영요소변화에 따른 석재측면 성형공구의 성능시험 연구

선우 춘¹⁾

A Study on the Capability of Edge Shape Milling Tool with the Operation Parameters of Equipment

Sun-Woo Choon

ABSTRACT Conventional polishing of stone panel edges has been done by hand. While this has changed somewhat with the advent of automatic machines, it is still very much a hand finishing technology. For the development of edge shape milling tool, the primary test on characteristics of edge shape milling tool was carried out. This paper presents the results of tests focused upon the milling capability that was varied by the variables of operation parameters. Author tried to confirm the effect of six operation parameters of equipment such as rotation speed, advance speed, applied load, water flow rate and rotational direction. The result from test was described in term of shape milling capability that was defined as cutting volume of rock by unit weight of tool wear. The variance of the results could indicate the optimum level of each operating parameters. The test was also carried out to determine the abrasion resistance varied according to the abrasive flow rate. The abrasion resistance was increased with the abrasive flow rate, but over some rate it was not changed.

Key words : edge shape milling tool, milling, abrasion resistance test, milling capability

초 록 석판재의 모서리 가공작업은 많은 경우 자동화가 이루어지고 있지만 제품의 형태가 복잡해지면 여전히 수작업에 의해 연마가 이루어지고 있다. 본 논문을 성형공구의 제작에 앞서 성형공구의 특성과 장비의 운영요소들의 변화에 따른 연마절삭성능을 파악하기 위한 기본시험이 수행결과를 나타내는 것이다. 장비의 운영요소는 헤드의 회전속도 및 이송속도, 가압하중, 급수율, 절삭방향과 이송방향이 포함된다. 실험결과는 연마절삭성능 즉 공구마모 무게에 대한 판재의 절삭량으로 표시하였고, 각 운영요소들 마다의 적정 운영수준이 제시되었다. 또한 연마재 투입량의 변화에 대한 마모시험에서는 마모도는 연마재의 증가에 따라 증가하지만, 어느 이상의 양에서는 오히려 감소하고 있다.

핵심어 : 성형공구, 연마절삭, 마모시험, 연마절삭능력

1. 서 론

석재의 가공을 위한 연마작업은 주로 수작업에 의존하고 있으나, 판재의 경우는 자동화가 이루어지고 있지만 제품의 형태가 복잡해지면 여전히 인력에 의한 연마가 대중을 이루고 있다. 아직까지는 resin bond 연마공구가 주류를 이루고 있으나, 다이아몬드 연마공구가 '80년대 중반에 석재연마에 도입되어 현재 많은 성능개선으로 가격경쟁력이 생기면서(Poirier, 1995) 이 분야의 공구는 다이아몬드 공구로 발전해 갈 전망이다.

석재가공공정에서 판재의 절삭속도와 연마속도가 상당한 차이를 보임으로써 공정의 부조화로 병목현상이

발생한다. 이는 장비의 자동화로 많은 부분이 개선되었지만 아직도 개선이 이루어져야 할 부분이다. 이러한 문제해결을 위해서 값은 싸지만 여러 단계의 연마를 거치는 재래식 연마공구를 다이아몬드 공구로 대체함으로써 공정을 맞추어 가고 있다. 다이아몬드 공구는 연마단계를 줄여줌으로써 연마시간의 단축에 의한 공정의 조화와 작업속도의 증가로 경제성이 제고되고 있다. 또한 다이아몬드 공구는 무게가 재래식보다 가벼워 진동이 적고 장비에 주는 부담감도 적어 장비의 수명도 증

1) 정희원, 한국동력자원연구소 자원개발부 책임연구원
원고 접수일 : 1998년 10월 9일
원고 심사 완료일 : 1998년 12월 20일

가될 수 있으며, 공구의 교환도 쉽고 빠른 장점이 있다.

수입에 의존하고 있는 석재측면 성형공구의 국산화를 위해 시험장비의 운영요소들의 변화에 따른 성형공구의 특성을 파악하기 위한 기초시험이 수행되었다. 따라서 본 논문에서는 다이아몬드의 측면 성형공구를 중심으로 장비의 운영요소 변화에 따른 연마절삭성능에 대해 언급한다. 석재의 측면성형은 일반적으로 석판재의 표면 처리를 위한 연마와는 달리 석판재의 측면을 곡면처리 하기 위해 석재를 가공하는 것으로 석재측면을 갈아내는 것이다. 따라서 앞으로 설명될 측면성형의 의미는 절삭보다는 연마에 의해 석재 측면이 갈아지는 것으로 여기서는 연마절삭으로 표시한다.

2. 석재 연마 시스템

석재 연마 시스템을 구성하는 중요한 3대 요소는 가공의 대상인 석재, 연마를 직접 담당하는 공구와 공구를 구동시키기 위한 장비로 대별할 수 있다.

2.1 가공 대상물

가공대상물은 연마작업에 있어서 결정적인 요소로 작용할지라도 작업 대상물이 정해지면 변화되는 요소는 아니다. 가공대상물인 암석은 구성광물의 성분, 입자의 크기 및 분포, 광물내의 균열 그리고 입자간의 결합상태 등이 연마성능에 영향을 줄 수 있으며 또한 강도, 경도 등과 같은 암석의 역학적인 물성도 연마성능에 많은 영향을 미친다. 따라서 연마작업의 최적화를 위한 시스템을 고려할 때는 다른 운영변수들이 변할지라도 항상 가공대상물이 첫 번째 영향요소로 고려되어야 할 것이다.

석판재 연마와 측면성형을 위한 연마절삭의 원리나 기구에 대한 연구가 활발하지는 않지만, 다이아몬드 공구의 다른 형태인 다이아몬드 톱의 절삭성능에 대한 연구보고가 있었다. 암석물성과 절삭장비의 마모율과의 비교에서 쇼야경도가 장비의 마모율과 가까운 관계가 있고, 압축강도와 인장강도는 경암에서는 의미가 없으며, 절삭력이 장비의 마모율과 직접적인 관계가 있음을 보이고 있다. 즉 절삭과정 동안에 발생하는 수직력을 측정함으로써 암석에 대한 절삭능력을 평가할 수 있다고 보고하고 있으나, 쉽게 측정될 수 있는 것은 아니다 (Wright와 Cassapi, 1985; Hausberger, 1990). Wright와 Wapler(1986)의 연구에서도 쇼야경도가 암석의 절

삭능력을 판단할 수 있는 빠르고 간편한 측정방법이라고 밝히고 있다.

2.2 공구

공구중에서 다이아몬드 공구는 석재의 절삭 및 연마 장비에 사용되는 대표적인 공구이며, 채석 및 석재가공에서 다음과 같이 여러 단계에서 사용되고 있다. 원석 채석 및 채취된 원석의 소규모 활석을 위한 diamond wire, 원석으로부터 큰 규모의 판재를 절삭하기 위한 diamond blade(gang saw), 판재의 절삭 및 마무리작업을 위한 원형 톱, 연마를 위한 연마공구 등이다. 가공 대상인 석재에 대한 연마장비 및 공구의 적절한 연마능력을 설정하기 위해서 장비와 공구에 대한 많은 시험이 없이 정확한 판단을 내린다는 것은 매우 어려운 일이다. 연마능력에 영향을 주는 요소들을 결정하기 위한 시험들이 시도되었지만(Wright & Cassapi, 1985; Wright & Wapler, 1986; Brile & Ratterman, 1990; Hausberger, 1990; Evans, 1994), 이러한 시험들은 간단한 판단방법의 제안에는 한계가 있다.

측면 성형공구에서 공구의 기하학적인 형상 외에도 성능에 상당한 영향을 주는 것은 다이아몬드의 형태, 크기 및 분포와 본드 종류와 같은 요소들이다. 이러한 요소들은 서로 상관관계나 보완적인 관계를 가지기 때문에, 장비성능의 최적화를 위한 공구설계에서 모든 요소들이 고려되어야 한다. 장비개선보다 공구를 개선함으로써 상대적으로 쉽게 연마절삭효과를 변화시킬 수 있다. 이것은 연마절삭공구의 특성에 상대적으로 적은 변화를 줌으로써 연마절삭성능에서 상당한 변화를 줄 수 있기 때문이다. 다이아몬드의 형태, 크기 및 분포와 본드의 종류와 같은 요소들은 하나의 단독 시스템으로 간주하는 것이 필요하다. 이들 중 어떤 한 요소를 변화 시킴으로써 다른 요소들로부터 예상되는 결과에 상당한 영향을 줄 수 있기 때문이다. 일반적으로 다이아몬드 공구시스템에서 가장 주목할 만한 효과의 변화를 얻을 수 있는 것은 본드시스템을 수정하는 것이다. 연마나 절삭동안 본드의 부정확한 마모는 다이아몬드의 결정탈락이나 파쇄와 같은 비효율적인 다이아몬드의 사용을 초래할 수 있기 때문이다. 다음으로 공구설계에서 중요한 요소는 다이아몬드 결정 그 자체이다. 다이아몬드 형태의 적절한 선택은 연마공정에서 중요한 역할을 하게 된다. 다이아몬드의 크기와 분포는 연마절삭시스템에서 연마점의 수를 결정하게 되며, 연마점에서 다이

Table 1. Summary of rock properties

Properties		Youngju (Y.J.)	Pocheon (P.C.)	Hwangdeung (H.D.)	Keochang (K.C.)	Munkyoung (M.K.)
specific gravity (MN/m ³)		0.0263	0.0261	0.0265	0.0265	0.0260
absorption (%)		0.285	0.390	0.303	0.327	0.574
strength	compressive (MPa)	215	146	133	165	133
	tensile (MPa)	14	8.5	8	8	7
Poisson's ratio		0.24	0.30	0.29	0.29	0.27
Young modulus (GPa)		50.8	43.0	38.2	48.8	47.7
seismic velocity	S-wave (m/sec)	2,440	2,010	1,970	2,130	2,090
	P-wave (m/sec)	4,280	3,610	3,460	3,770	3,980

아몬드의 하중을 균등하게 배분할 수 있게 해주는 역할을 한다. 따라서 각 다이아몬드 결정에 작용하는 하중의 크기는 연마점의 수에 의해 결정되며, 결과적으로 이러한 요소들은 공구의 수명과 능력에 영향을 주게 된다.

2.3 장비

장비와 관련되는 요소는 장비자체의 구조적인 문제, 장비를 운영하는 사람 그리고 진동 등과 같은 외부의 물리적 영향들이 포함될 수 있다. 공구의 회전속도, 이송속도 그리고 연마질삭식도, 수직하중 등은 조절할 수 있는 요소들로서 연마질삭시스템의 최적화를 결정하는데 있어 중요한 요소가 될 수 있기 때문에 장비의 운영에 있어서 관심을 기울여야 한다.

연마시스템의 여러 요소들 중에서 한 요소의 변화는 다른 요소에 상당한 영향을 미치게 되며, 각 경우에 있어서 한 요소의 변화에 대한 연마효과는 항상 서로 타협적이기 때문에, 한 부분에서 긍정적인 결과를 얻게 되면 또한 다른 부분에서 부정적인 결과가 초래될 수 있다는 것을 명심해야 한다. 예를 들어 다이아몬드 결정의 분포도를 증가시키면 공구의 수명이 연장되는 장점은 있지만, 공구가격의 상승과 연마질삭속도가 감소되는 단점을 초래하는 이중성을 갖는다.

3. 암석의 마모시험

3.1 개요

암석의 마모도는 암석 내에 존재하는 여러 광물의 분포형태, 광물과 광물사이의 결합력, 광물의 양 및 광물 내의 벽개성 등에 의존한다. 암석의 마모시험은 마모에 대한 저항을 측정하는 시험으로 다른 재질과의 관계로

Table 2. Mineralogical composition of specimen (unit : %)

Granite	quartz	feldspar	mica	others
Youngju	50.0	35.7	12.0	2.3
Pocheon	27.4	66.4	4.4	1.9
Hwangdeung	36.4	51.9	7.9	3.6
Keochang	36.2	50.4	9.4	4.0
Munkyoung	37.1	56.7	4.0	2.1

서 연마재에 의한 마모, 금속과의 접촉에 의한 마모, 암석들 자체의 접촉에 의한 마모 등이 포함될 수 있다. 마모시험 방법은 시험방법의 특성에 따라 충격에 의한 마모시험(abrasive wear impact test), 압력에 의한 마모시험(abrasive wear with pressure test), 마찰시험(attrition test)의 세 가지로 크게 구분된다.

이번 마모시험에는 암석과 회전하는 금속표면사이에 연마재를 넣어 시험하는 Dorry 마모시험이 이용되었다.

암석의 마모저항과 연마재 투입량에 따른 암석의 마모성능을 검토하기 위하여 5종의 화강암(Table 1 및 Table 2) 거창석, 문경석, 영주석, 포천석 그리고 황등석을 대상으로 Dorry 마모시험을 실시하였다.

3.2 Dorry 마모 시험

3.2.1 시험장치

이 시험은 암석의 마모 저항력을 측정하는 시험으로서 연마재에 의한 마모, 금속면과의 접촉에 의한 마모, 암석간의 상호 접촉에 의한 마모 등을 포함하고 있다. 시험은 ASTM C2451-90의 규정에 의거한 Dorry 마모 시험기를 이용하였다(Fig. 1).

시험에 사용된 시료는 직경 50 mm, 두께 25 mm의 원주형 공시체를 3개 이상을 준비하여 이 시험편에

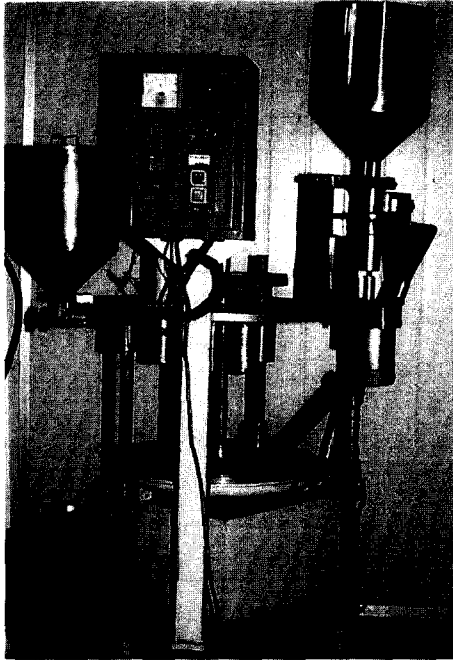


Fig. 1. Apparatus for abrasion resistance test

2,000 g의 하중을 가하면서 금속원판에 압착시킨다. 그리고 일정량의 연마재를 투입하면서 금속원판을 45 r.p.m.으로 회전시킨다.

3.2.2 시험방법

시험중에는 60 mesh의 carborundum 연마재를 분당 50 g으로 투입하며 회전원판이 225회 즉 5분간 회전할 때까지의 무게손실을 측정하여 원래 시험편의 비중과 중량을 이용 다음 식에 의하여 마모경도(H_a)를 계산한다.

$$H_a = \frac{10G \times (2,000 + W_s)}{2,000 \times W_a}$$

여기서, G : 시험편의 비중

W_s : (시험전의 중량+시험후의 중량)/2

W_a : 시험중에 손실된 중량

이 식에서 $2,000+W_s$ 는 시험중에 시험편에 가해진 압력을 나타내며 W_s/G 는 시험중 연마된 부피의 손실을 나타낸다. 이 값을 역으로 나타내어 마모저항성을 표시하며, 이 값에 대략 10을 곱한 값이 마모경도의 값이 된다.

3.2.3 결과고찰

Table 3. Dorry's abrasion resistance of each specimen

	Dorry's abrasion resistance	compressive strength (MPa)
Youngju	28.66	215
Pocheon	23.78	146
Hwangdeung	21.03	133
Keochang	23.07	165
Munhyung	23.07	133

Table 3은 앞의 5개 화강석에 대한 Dorry 마모경도 실험결과를 나타낸 것이다

Fig. 2는 Dorry 마모경도와 시료들의 암석물성과의 상관관계를 나타낸 도표들로 적은 자료의 결과로 부분적인 관계를 추정할 수 있을 뿐이지만, 강도와와의 관계는 이전에 이루어졌던 실험자료들도 포함시킨 것들이다.

전체적으로 Dorry 마모경도는 압축강도, 인장강도와 비례하며, P와 속도 그리고 쇼아경도와도 비례할 것이라고 추정할 수 있지만 시험자료의 부족으로 명확하지는 않다. 암석의 광물성분과의 상관관계도 석영성분과 비례하고 장석성분과 반비례될 것이라고 추정되지만 이러한 상관관계에 대한 연구가 더욱 이루어져야 할 것이다(Fig. 2).

3.3 연마재 투입량에 따른 마모도 변화

연마재 투입량의 변화가 암석마모에 미치는 영향을 살피기 위한 시험이 60 mesh carborundum 연마재의 투입량을 분당 40, 50, 60, 70 그리고 80 g의 5단계로 변화시키면서 실시되었다. Fig. 3은 5종의 시험시료에 대해 45 r.p.m.으로 5분간 회전시킨 후의 시료무게손실을 나타낸 것이며, 그때의 Dorry 마모경도의 변화를 Fig. 4에 표시하였다. 이 실험결과는 영주석의 마모경도가 전체적으로 가장 높고, 황등석이 가장 낮게 나타나 영주석이 마모에 강하고 황등석이 마모에 가장 약한 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 5개의 암종 모두에서 연마재의 투입량이 40 g에서 70 g까지 증가함에 따라 암석의 마모량이 증가하지만 50 g까지는 마모량이 급증하고 그 이상에서는 점차 증가율이 둔화되거나 감소하는 것을 볼 수 있다. 70 g 이상의 투입에서는 증가율이 감소되는 것을 볼 수 있다. 이것은 연마재간의 상호작용과 암분의 생성이 암석연마의 방해요소로 작용하는 것으로 볼 수 있다. 이에 따른 마모경도는 연마재의 투입량의 증가에 따라 반비례 한다.

많은 양의 연마재투입이 연마성능에 좋은 효과만을

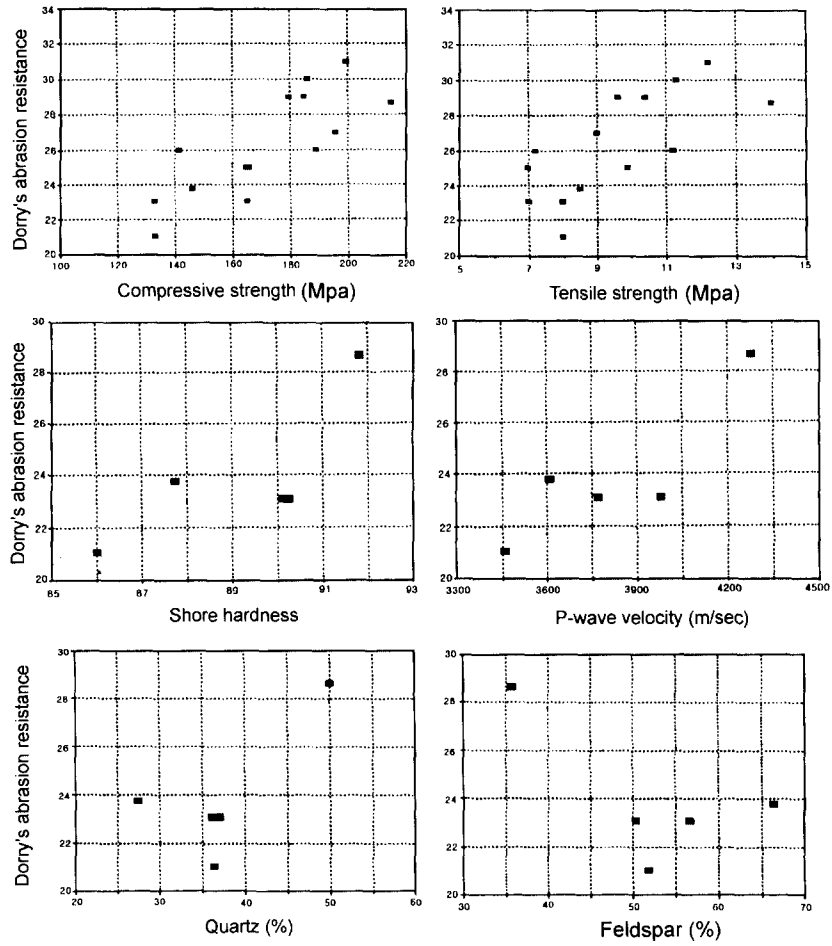


Fig. 2. Relationship between rock strengths and Dorry abrasiveness

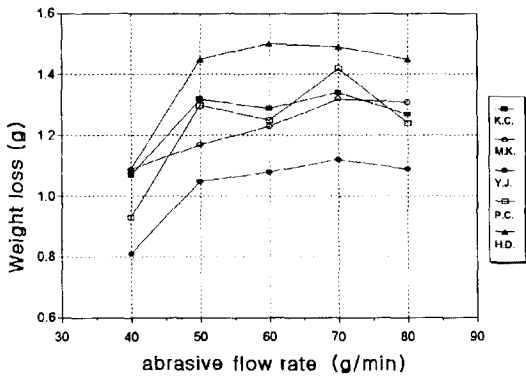


Fig. 3. Variation in the weight loss of tool with abrasive flow rate

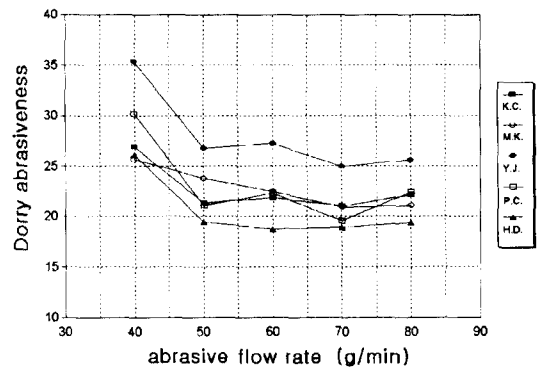


Fig. 4. Relationship between Dorry abrasiveness and abrasive flow rate

주는 것이 아니다. 따라서 모든 석재연마나 절삭 가공 작업에 있어서 대상암석에 대한 공구의 특성을 파악하

여 장비를 운용한다면 경제적이며 효율적인 작업이 이루어 질 수 있을 것이다.

4. 석재 성형공구의 성능시험

4.1 시험장비

시험장비는 본 연구목적에 맞도록 시험장비(Fig. 5)를 제작하여 시험을 실시하였다. 시험장비는 전진 및 후진의 이송속도, 연마절삭헤드의 회전수(rpm), 연마절삭의 폭 및 연마절삭헤드의 가압하중, 반복 행정수 및 급수율을 결정하여 범위를 설정해 놓으면 자동으로 측면성형작업이 이루어지도록 제작되었다. 시험중 시편에 작용하는 수직하중과 회전수와 이송속도의 자료는 A/D 변환기를 통해 컴퓨터에 입력될 수 있다. 측면성형이 가능한 암석시료의 길이는 600 mm이며, 두께는 사용되는 성형공구의 크기에 따라 달라질 수 있다.

본 시험에서 사용된 측면성형공구(Fig. 6)는 상업적으로 제작되는 어떤 형상의 성형공구가 아니라, 먼저 측면성형공구의 특성을 살피기 위해 이화다이아몬드공업(주)에서 제작한 평자형의 측면성형공구로 시험을 실시하였다. 공구의 규격은 총직경이 71 mm, shank의

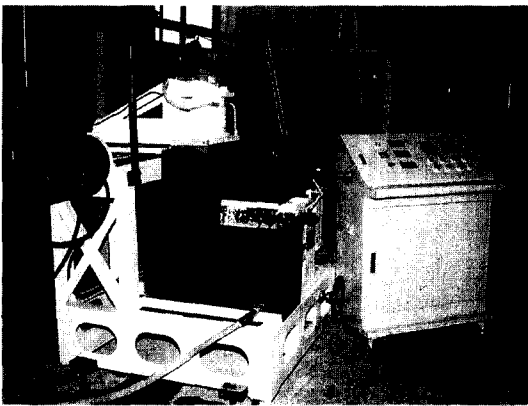


Fig. 5. Equipment for edge shape milling test

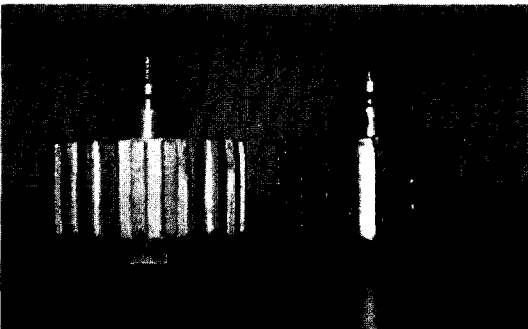


Fig. 6. Diamond wheel for edge shape milling

직경은 63 mm, 공구의 높이는 33 mm이고 부착된 다이아몬드 팁들은 두께 4 mm, 폭 5 mm로 제작되었으며, 다이아몬드 팁의 수는 21개를 부착하였다.

포천석, 영주석 그리고 황등석(Table 1 및 2 참조)을 대상으로 시험이 실시되었고, 시험후 연마절삭공구의 마모량을 측정기 위해 1/100 mm 단위로 마모량을 측정하였다.

4.2 시험방법

측면성형공구의 연마절삭성능 시험을 위해 사용되는 시험조건은 복합변수가 작용하기 때문에 한 요소의 단독에 의한 영향보다는 요소상호간의 교호작용이 작용할 가능성이 높다. 따라서 한 요소의 변화에 대한 1차원적인 최적화의 경우보다는 시험계획법에 의한 시험이 타당성이 있지만, 이 시험의 경우 요소의 수(n)나 각 요소가 취할 수 있는 단계(l)를 고려할 경우 이러한 시험은 요소의 수 n 의 증가에 따라 시험을 해야할 수가 기하급수적(n^l)으로 증가하기 때문에 시험에 많은 어려움이 따른다. 우선 한 요소의 변화에 대한 1차원적인 최적화에 대한 시험을 수행하였다.

장비의 운영요소들을 변화시키면서 마모손실량과 팁의 마모량을 측정하였다. 장비의 운영요소에는 헤드의 회전속도 및 이송속도, 가압하중, 급수율, 절삭방향과 이송방향 등이 있다. 또한 연마절삭성능에 대한 평가지표로는 공구마모심도, 공구마모체적, 또는 단위 절삭체적당 소모된 에너지의 양 등이 있지만, 본 시험에서는 연마절삭성능에 대한 평가지표로는 성형공구의 단위 마모무게 당 석판재의 손실체적량으로 표시되는 연마절삭성능(cm^3/g)으로 표시하였다. 성형공구의 손실량 측정은 시험전에 성형공구의 무게와 공구의 규격을 측정하고 일정 길이의 석판재를 연마절삭한 후 공구를 완전히 건조시켜 마모된 폭의 길이와 무게를 측정하여 마모손실량을 계산하였다. 일반적으로 15번의 행정을 반복 후(9 m)마다 공구의 변화 상태를 측정하였다.

Evans(1994)는 수작업에 의한 측면가공의 연구에서 변수들 사이의 상호관계는 마감처리에 상당한 영향을 주기 때문에 변수를 바꿀 때에는 주의를 기울여야 한다고 했다. 연마결과에 영향을 미치는 가장 두드러진 변수는 접촉력 즉 가압하중과 회전속도인데 주수량과 연마판의 통과 횟수도 중요한 변수라고 했다. 물론 연마기, 석재의 종류에 따라 변수값이 달라질 수 있으나 시험대상 석재에서는 작업자가 조절할 수 있는 2가지의

주요 변수가 있는데 석재판에 가하는 접촉력과 모터의 회전수와 연마판의 직경에 의해 결정되는 표면속도라고 했다.

시험은 연마절삭헤드의 회전을 3000 rpm, 이송속도 50 cm/분, 가압하중 15 kg, 분당 5 l의 급수량으로 고정하고 각 변수에 대해 여러 단계로 변화시키면서 이루어졌다. 선정된 요소들은 최대 연마절삭성능을 나타낼 때의 값이 아니라, 시험의 안정성을 고려하여 낮은 단계의 요소값으로 선택하였다.

4.3 시험결과 고찰

시험은 각 시험 운영조건에서 석판재의 시료를 이용하여 일정한 수의 연마절삭행정을 반복한 후(일정한 길이)에 마모측정기를 이용하여 21개의 공구팁마다 2군데에서 사용전후의 마모를 측정하고 무게를 측정하여 평균값을 구하였다.

4.3.1 회전수

일반 시제품의 측면성형장비는 모터의 회전수가 고정되어 있고 일반적으로 수동으로 힘을 가하여 연마절삭작업을 하도록 되어 있다. 이 시험은 연마절삭헤드의 회전수 변화 즉 측면성형공구의 선속도 변화가 연마절삭능력에 미치는 영향을 살피기 위한 것으로 이송속도, 가압하중, 급수량을 고정하고 연마절삭헤드의 회전수 변화를 5단계로 실험을 실시하여 일정 길이를 연마절삭한 후에 연마공구의 마모율을 측정하였다.

Fig. 7은 포천석과 영주석 그리고 황등석을 대상으로 연마절삭조건을 이송속도 50 cm/분, 가압하중 15 kg, 분당 5 l의 급수량을 고정하고 연마절삭헤드의 회전을 2400, 2700, 3000, 3300 그리고 3600 rpm으로 변화시켰을 때의 연마절삭성능을 나타내는 것이다. 전체적

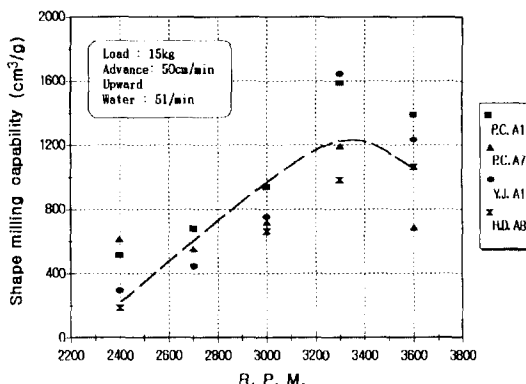


Fig. 7. Variation of shape milling capability with r.p.m.

으로 연마절삭성능은 회전수 증가와 함께 증가하다가 3300 rpm 이상의 회전수에서는 연마절삭성능이 감소한다.

회전속도가 저속일 때는 같은 양의 공구마모에서 석재를 연마절삭할 수 있는 연마절삭량은 낮으며 회전속도가 증가될수록 연마절삭할 수 있는 암석의 체적이 증가된다. 이것은 낮은 속도에서는 단위시간당 성형공구에 걸리는 부하가 커지기 때문이며, 또한 너무 빠른 회전속도는 성형공구에 무리를 주기 때문에 연마절삭능력이 떨어지게 된다.

따라서 연마절삭성능은 회전수의 증가와 함께 증가하다가 어떤 회전수 이상에서는 감소된다. 석재의 종류와 공구에 따라 단위 무게당 연마절삭이 가능한 체적이 회전수에 따라 2~5배 정도까지 상당한 차이를 보이고 있다. 이와 같이 이상적인 연마장비는 암석의 조건에 따라서 회전수를 전환할 수 있는 장비시스템이 좋으나 장비의 대부분이 회전수를 변화시킬 수 없기 때문에 다른 요소를 변화시킴으로써 연마절삭효과를 얻어야 할 것이다.

회전속도의 증가가 연마절삭능력을 증가시키지만 회전속도의 증가에 따른 에너지의 증가 그리고 장비에 주는 부하 등을 고려할 때 경제성면에서 회전속도의 증가만이 연마절삭효과의 증가를 가져온다고는 볼 수 없다. 따라서 경제적 및 생산적인 측면에서의 회전속도 결정은 에너지 소모측면을 고려한 시험이 수행되거나 더 높은 회전속도에 대한 시험이 필요하지만 현재 상황으로 더 이상의 회전속도는 연마절삭능력에 큰 영향을 주지 못할 것으로 생각된다.

4.3.2 이송속도

이송속도의 변화가 연마절삭능력에 미치는 영향을 살피기 위해서 회전속도, 가압하중, 급수량을 고정하고 연마절삭헤드의 이송속도를 4단계로 하는 시험조건으로 일정한 길이를 연마절삭한 후에 성형공구의 마모를 측정하였다. Fig. 8은 포천석과 영주석을 대상으로 회전속도 3,000 rpm, 가압하중 15 kg, 분당 5 l의 급수량을 고정하고 이송속도를 30, 40, 50 그리고 60 cm/분으로 변화시켰을 때의 연마절삭성능을 나타내는 것이다. 연마절삭성능은 이송속도의 증가와 함께 감소한다. 이송속도가 빨라짐에 따라 연마절삭성능이 급격히 감소되나 이송속도가 빨라질수록 감소율은 둔화된다. 이송속도가 2배 증가됨에 따라 연마절삭능력이 약 4배 정도 감소되고 있다. 낮은 이송속도에서는 연마절삭능력이 높기 때

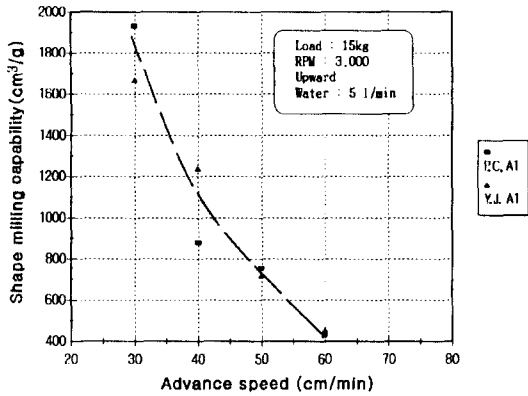


Fig. 8. Variation of shape milling capability with advanced speed

문에 경제적인 면에서는 좋을지라도, 낮은 이송속도는 작업속도 뿐만 아니라 자동화시스템에서는 작업의 흐름에 상당한 영향을 줄 수 있다. 따라서 이송속도의 경우는 경제적인 면에서 보다는 작업속도나 작업공정면 즉 생산속도 측면에서 결정되어야 할 요소이다.

4.3.3 가압하중

암석에 가해지는 하중변화와 연마절삭성능의 관계에 대한 시험은 회전속도를 3,000 rpm, 이송속도를 50 cm/분, 분당 5 l의 급수량으로 고정하고, 가압하중을 10, 15, 20, 25, 30, 35 kg으로 변화시키며 이루어졌고, 가압하중의 변화에 따른 연마절삭성능의 결과는 Fig. 9와 같다. 연마절삭성능이 가압하중의 증가에 비례하여 증가되지만, 20 kg 이상에서는 감소하였다. 따라서 이 시험조건하에서는 20 kg 정도가 적정 가압하중으로 볼 수 있다. 연마절삭성능이 증가되다가 감소하는 것은 가

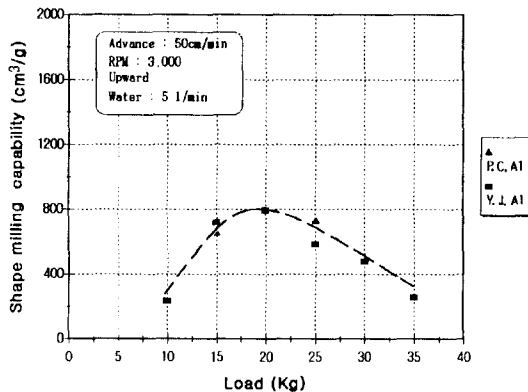


Fig. 9. Variation of shape milling capability with applied load

압하중이 증가되면서 성형공구가 암석시료에 과도한 부하를 줌으로써 연마절삭헤드의 회전상태를 둔화시키거나 공구와의 접촉이 좋지 못하고 튀는 현상 때문이다.

수작업이 많은 측면가공에서는 인력으로 10 kg 이상의 하중을 계속적으로 가하면서 작업을 하는 것은 상당한 무리가 따른다. 따라서 가압하중면에서 보면 수작업의 경우는 가장 낮은 연마절삭성능에서 작업을 하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 면에서 볼 때 약간의 하중을 지속적으로 줄 수 있는 장치만을 보완해 준다면 생산성이 3배 정도는 증가될 수 있을 것이다. 따라서 생산성을 향상시키기 위해서는 보다 기계화된 작업방법으로 반드시 전환되어야 한다.

4.3.4 연마절삭의 방향

성형공구의 회전방향과 시료의 전진방향이 반대일 때 즉 상향연마절삭(Upward)과 공구의 회전방향과 시료의 전진방향이 서로 같을 때인 하향연마절삭(Downward)이 연마절삭성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 회전속도를 3,000 rpm, 이송속도를 50 cm/분, 분당 5 l의 급수량 그리고 15 kg의 가압하중으로 고정하고 연마절삭 방향을 변화시켜 실험을 실시하였고 이 결과를 나타낸 것이 Fig. 10 이다. 포천석과 영주석 모두에서 하향연마절삭의 경우가 상향연마절삭 경우보다 1.2배 정도 연마절삭성능이 높게 나타나고 있다. 또한 내연마성이 낮은 포천석의 경우는 영주석에 비해 연마절삭이 쉽게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이런 면에서 현장에서 사용되고 장비들은 작업방향에 따라 연마절삭헤드의 회전방향을 없지만 경제적인 면에서 연마절삭의 방향에 따라 헤드의 회전방향을 바꿀 수 있는 장비로 대체하는 것이 좋다.

4.3.5 급수량

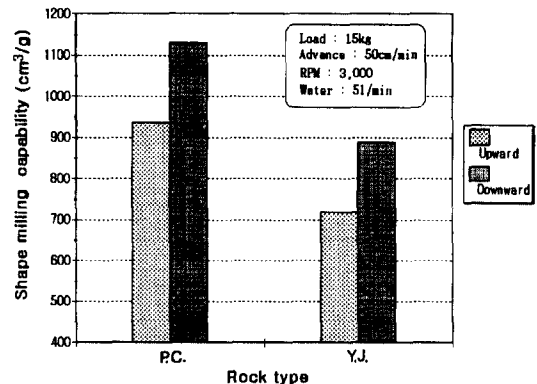


Fig. 10. Relationship between milling capability and milling direction

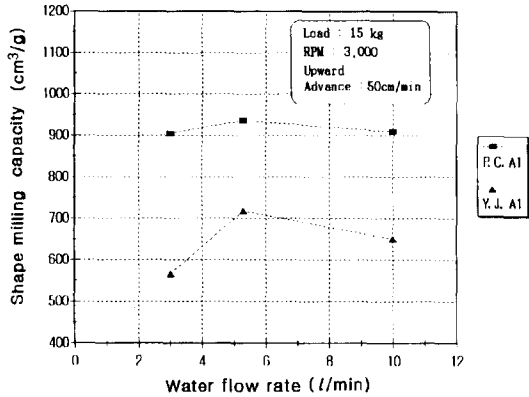


Fig. 11. Variation of shape milling capability with water flow rate

냉각수 공급량의 변화에 따른 연마절삭성능에 대한 시험은 공구의 회전속도를 3,000 rpm, 이송속도 50 cm/분, 가압하중 15 kg에 고정하고, 냉각수의 공급량을 분당 3, 5, 10 l로 전 단계에 비해 약 배로 증가시키면서 3단계에 대해 포천석과 영주석을 대상으로 시험을 실시하였다. Fig. 11은 급수량의 변화에 따른 연마절삭성능의 변화를 도시한 것이다.

연마절삭성능은 수량이 증가되면서 증가하다가, 5 l/분 이상의 급수량에서는 완만하게 감소한다. 여기에서도 압축강도가 낮고 내연마성이 낮은 포천석이 영주석에 비해 연마절삭성능이 높게 나타나 포천석이 보다 쉽게 연마되는 것을 볼 수 있다. 물공급의 증가가 연마절삭능력에 좋은 효과를 주지만, 많은 양의 물은 연마절삭효과를 감소시키는 것을 볼 수 있다. 물은 평판에서 보다 측면에서 더 쉽게 흘러내리기 때문에 측면 가공시 더 많은 양의 물이 소요될 것이다. 물의 양이 너무 적으면 연마절삭기의 수명을 단축시킬 수 있고, 돌 부스러기에 의해 혼적이 생길 수도 있다. 또한 물의 양이 너무 많으면 수막현상으로 마감처리가 잘되지 않거나 원하는 연마절삭결과를 얻기 위해서는 시간이 더 소요될 수도 있다.

5. 결 론

Dorry 마모시험의 결과는 다음과 같다.

1) 전체적으로 Dorry 마모경도는 압축강도, 인장강도와 비례하며, P과 속도 그리고 쇼아경도와도 비례하고, 암석의 광물성분과의 관계는 석영성분과 비례하고 장석성분과 반비례될 것이라고 추정되지만 시험자료의

부족으로 명확하지는 않다. 따라서 이러한 상관관계에 대한 연구가 더욱 이루어져야 할 것이다.

2) 연마재 투입량에 따른 마모의 변화는 연마재 투입량이 증가함에 따라 암석의 마모량이 증가하지만 어느 양까지는 마모량이 급증하고 그 이상에서는 점차 마모량의 증가율이 둔화 및 감소한다. 이와 같은 최대 마모량을 나타내는 투입량이 그 암석에서의 적정 투입량이 되며, 투입량이 더욱 많아지면 오히려 증가율이 감소하는데 이것은 연마재간의 상호작용과 암분의 생성으로 연마의 방해요소로 작용하는 것으로 생각된다.

장비의 운영요소에 따른 석재측면성형공구의 연마절삭성능시험의 결과는 다음과 같다.

1) 회전속도의 증가가 연마절삭능력을 증가시키지만 어떤 회전수 이상에서는 오히려 감소된다. 석재의 종류와 공구에 따라 단위 무게당 연마절삭가능 체적이 회전수에 따라 2~5배 정도까지 차이를 보이고 있다. 회전속도의 증가가 연마절삭능력을 증가시키지만 회전속도의 증가에 따른 에너지의 증가 및 장비에 주는 부하 등을 고려할 때 회전속도의 증가가 경제성면에서 연마절삭과의 증가를 가져오는 것은 아니다. 따라서 경제적 및 생산적 측면에서 회전속도의 결정은 에너지 소모측면을 고려한 시험이 더 수행되어야 한다.

2) 이송속도가 빨라짐에 따라 연마절삭성능이 급격히 감소되고, 속도가 빨라질수록 감소율이 둔화된다. 낮은 이송속도는 연마절삭능력이 높지만, 작업속도 뿐만 아니라 자동화 시스템에서는 작업의 흐름에 상당한 영향을 줄 수 있다. 따라서 이송속도의 경우는 경제적인 면보다는 작업속도나 작업공정 측면에서 결정되어야 할 요소라 생각한다.

3) 가압하중의 증가에 비례하여 연마절삭성능이 증가되다가 다시 감소하는 경향을 보이며, 이러한 감소는 가압하중이 증가하면서 과다한 부하가 연마절삭헤드의 회전상태를 둔화시키거나 접촉상태를 나쁘게 하기 때문이다. 수작업의 형태로 이루어지는 측면가공에서는 10 kg 이상으로 지속적인 하중을 가하는 것이 어렵기 때문에 가압하중면에서 가장 낮은 연마절삭성능에서 작업을 하고 있다고 볼 수 있다. 이런 면에서 하중을 지속적으로 줄 수 있는 장치만을 갖추어도 생산성이 3배 정도는 증가될 수 있을 것이다.

4) 절삭방향에 따른 연마절삭성능은 하향연마절삭이 상향연마절삭보다 1.2배 정도 연마절삭성능이 높게 나타나고 있다. 실제 기존장비들은 연마절삭헤드의 회전

방향을 바꾼다는 것은 쉽지 않지만, 경제적인 면에서 연마절삭방향에 따라 회전방향을 바꾸어야 한다.

5) 많은 양의 물은 연마절삭능력에 좋은 효과를 주지만 너무 많은 양의 물은 연마절삭효과가 오히려 감소된다.

참 고 문 헌

- Birle, J.D. and E. Ratterman, 1990, An approximate ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory test, *Dimensional Stone*, July/Aug., pp. 39-44.
- Evans, R.W., 1994, Granite & Marble edge polishing with diamond tools: The only way to go, *Dimensional Stone*, Oct., pp. 12-23.
- Hausberger, P., 1990, Stone Machinability, *Stone Industries*, Nov./90, pp. 28-31.
- Poirier, M., 1995, An overview of diamond polishing, *Stone World*, Oct., pp. 52-56.
- Wright, D.N. and V.B. Cassapi, 1985, Factors influencing stone sawability, *Industrial Diamond Review*, vol. 2, pp. 84-87.
- Wright, D.N. and H. Wapler, 1986, Investigation and production of diamond wear when sawing, *Anales of the CIRP*, vol. 35, No. 1, pp. 239-244.