

워터젯 시스템을 이용한 석재표면처리장치 개발

강지호* · 장명환**

군장대학 산업경영과*
대한광업진흥공사 자원개발처**

Development of the stone surface process equipment by Water Jet System

Ji-Ho Kang* · Myoung-Hwan Jang**

*Dept. of Industrial Engineering, KunJang College

**Dept. of Mineral Development, Korea Resources Corporation

There is boner process of stone manufacturing to become quality down of stone to consolidated micro crack appearance of stone surface and biotite by fire that is to be route process in stone surface by flame of LPG. And then, it is develop that stone surface process equipment by automation for the work method of boner process can be substitute work method by water jet To development of equipment, There is to be down noise and dust. According to remove calamity growth hazardous substance in the work environment, there is to solve workplace avoidance factor.

Keywords : 석재표면처리, 수압분사, 화염분사, 버너공정, 워터젯, 내구성, 요철

1. 서 론

우리나라의 석재산업은 크게 원재료 공급측면에서 부존자원을 개발하는 채석업, 채석된 원석을 건축재와 석제품으로 가공하는 석재가공업, 건설부문 기초 원자재를 공급하는 석산골재업으로 구분된다[1]. 이중 석재가공업은 업체당 매출액이 연간 10억원 수준이고, 대부분의 사업장이 근로자수가 10인 미만으로 영세하고 작업환경 또한 매우 열악한 실정이다[1]. 특히 석재가공업의 화염버너 공정은 LPG 화염을 이용하여 석재표면을 거칠게(요철) 하는 작업으로 가열에 따른 석재 구성광물의 열응력으로 석재표면의 미세 균열현상과 열에 의한 혹은 모가 용착되어 석재 품질의 저하 요인이 될 뿐만 아니라 고온고압의 화염에 의하여 석영성분 등이 떨어져 나가 원래의 석판재 두께가 3 mm정도 감소된다는 단점도 있다[7][8]. 또한 석재표면 작업시 분진이 노출기준을 초

과하고 있으며, 고열취급에 따른 화상, 파편타박상등 재해위험이 매우 높은 공정으로 안전상의 문제가 되기 때문에 화염 버너공정에 대한 개선의 필요성이 있다. 본 연구에서는 화염버너 공정의 열악한 열처리 작업공정을 대체 할 수 있고, 생산성과 품질개선 및 부가가치를 향상시킬 수 있는 워터젯(Water-jet) 시스템을 이용한 표면처리 장치개발에 역점을 두었다.

2. 석재가공업의 화염버너공정 진단

석재표면처리 가공은 전통적인 인력에 의한 방법과 전통공구를 이용한 기계 다듬기가 있다[2]. 현재는 이러한 표면처리를 보다 경제적으로 가공하기 위하여 화염버너에 의한 가열 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 화

염버너 가공은 보통 제트버너 또는 자동버너처리라고 하며 화성암계열의 표면처리에 사용한다. 분사되는 고온의 불꽃에 의하여 독특한 가공면을 형성하며, 이때 화염온도 약 1,800~2,000℃로 돌 표면을 가열하여 열에 의한 팽창으로 암석 표면의 석영입자를 통겨내어 요철면을 얻는 작업방법으로 <그림 1>과 같은 토치에 의한 인력 작업과 <그림 2>와 같은 PLC를 이용한 자동버너 방법이 있다[6].



<그림 1> 수동 버너작업



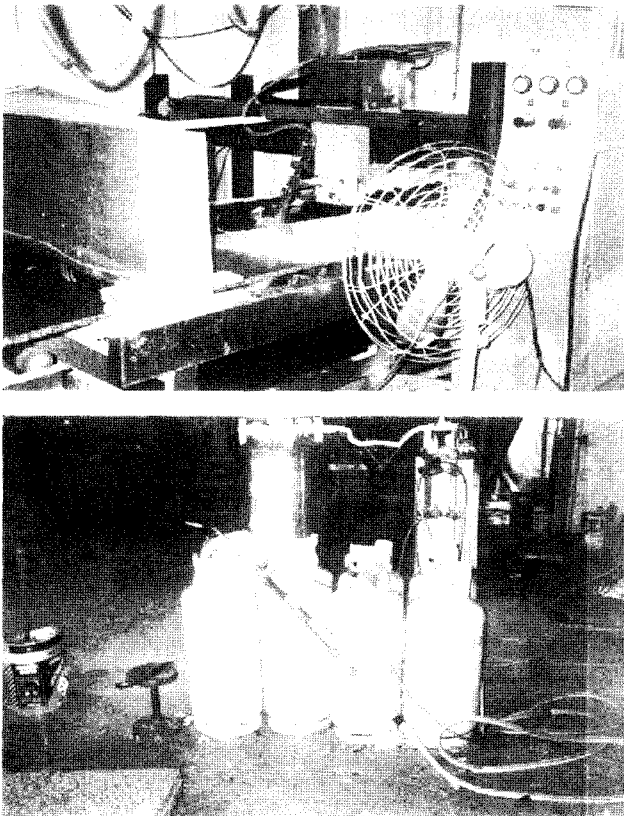
<그림 2> PLC 자동버너작업

본 연구에서는 건축용 판재 생산업체를 대상으로 애로사항을 조사하고 현장진단을 통해 공정별로 재해취급 유해물질과 재해발생 유해인자 등을 <표 1>과 같이 파악하였다. 또한 개선대상 공정인 화염버너공정에 대하여 집중적인 현장진단을 통하여 다음과 같은 문제점을 도출하였다.

<표 1> 석재가공업의 공정별 재해취급유해물질과 재해발생유해인자

공정명	원석투입	절단	표면처리가공		재단	포장/출하
			연마	화염버너		
사용설비	지게차	절단기	연마기	버너기	재단기	지게차
재해취급 유해물질	-	-	-	LPG, O2	-	-
재해발생 유해인자	중량물	소음, 중량물	소음, 분진	소음, 분진, 고온	소음, 분진	중량물

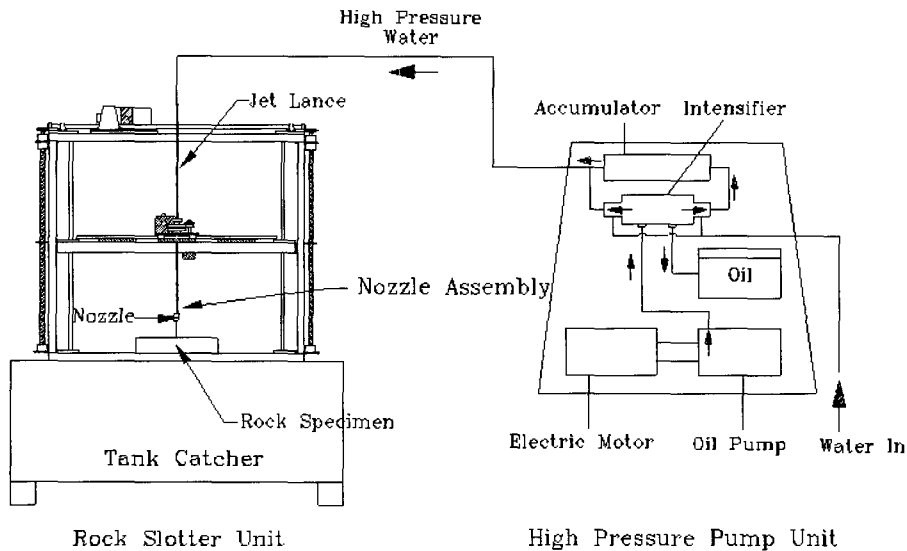
- (1) <그림 3>과 같은 화염 버너공정은 고압산소와 LPG 가스를 사용하기 때문에 석재표면 가공과정에서 소음 (95-97 dB)과 석영, 운모 등 비산분진 (3.5-3.7 mg/m³)이 다량 발생되고 있어 장기간 작업시 근로자의 소음성 난청 및 진폐발생 등이 우려될 수 있다.
- (2) 작업자의 안전 등에 대한 안전조치가 미흡하여 가열되어진 비산된 파편이 피부에 접촉시 재해로 이어질 가능성이 크기 때문에 안전상의 문제가 되고 있는 실정이다.
- (3) <그림 3>에서와 같이 수동버너는 LPG 배관 대부분이 역화 방지기가 미설치 되어 있어 산소가 LPG 배관으로 역류시 화재폭발의 위험이 크다. 일부 자동버너는 역화 방지기가 부착되어 있는 경우가 있었다.
- (4) 화염버너 작업은 고압의 산소와 LPG에 의한 화염을 사용하여 석영성분 등을 떨어져 나가게 하기 때문에 원래의 석판재가 3 mm정도 두께가 감소되어 내구성이 떨어진다.



<그림 3> 화염버너공정작업 장면과 수동버너 장비

3. 워터젯 시스템의 구성

워터젯 시스템(Water-jet System)은 고압수의 생성단계에서 분사까지 전공정에 직간접적으로 관계된 모든 장비들과 그 응용에 따라 달라지는 모든 부대장비들을 말한다. 이미 워터젯 시스템은 타 산업분야에서 다양하게 사용해 왔다. 국내에서도 워터젯 시스템이 사용되고 있는 대표적인 응용분야로는 각종 불순물의 제거, 도막, 녹, 콘크리트 등 표면 박리 제거 등에 활용되고 있다. 석재산업분야에서 암석의 블록절단과 소규모 가공을 위해 사용 중에 있으나 석재표면처리 공정에는 현재까지 전혀 활용하지 않고 있다. 워터젯의 유형은 연속식, 연마재 투입식, 캐비테이션식(Cavitation fluid jet), 펄스식(Pulsed fluid jet)의 4가지 기본 유형이 있으며, 압력과 흐름의 크기, 즉 수력(hydraulic power)에 따라 연속식 워터젯을 형성시키는 펌프에는 플랜저 펌프(plunger pump)와 증압기 펌프(intensifier pump)의 두 종류가 있다. 플랜저 형식에서는 노즐이 물의 흐름을 제한함으로써 고압수 운송회로에 압력이 걸리면서 고압이 형성된다. 워터젯 시스템의 개념을 <그림 4>와 같이 간단하게 나타내었다.



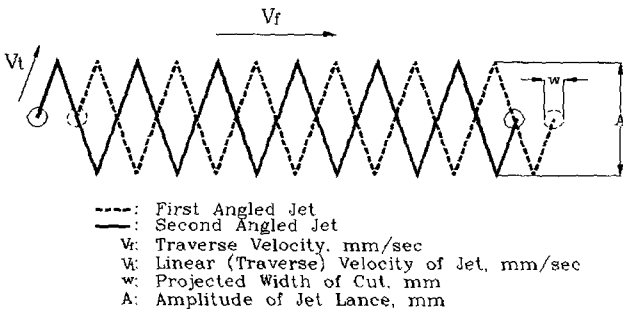
<그림 4> 워터젯 시스템의 구성도

워터젯 시스템은 일정한 진폭으로 회전하면서 진동하는 분사노즐에 의해 석재표면을 거칠게 가공(요철)한다. <그림 5>는 2개의 분사구를 가진 노즐이 고압수를 분사

하면 시료의 표면에 거칠게 형성하는 궤적을 평면도상에서 개략적으로 보여주고 있다.

워터젯 시스템은 응용목적과 필요에 따라 여러 구성

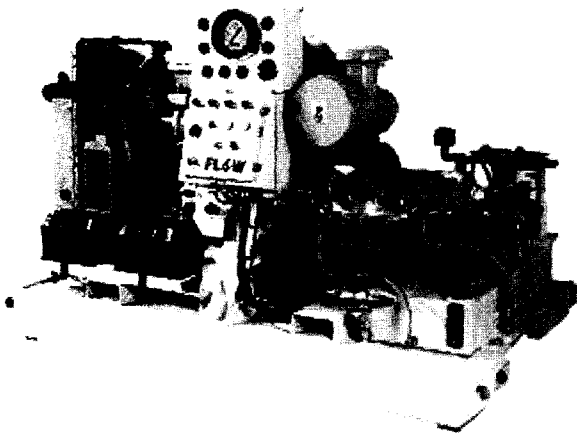
장치로 구분할 수 있으나 본 연구에서는 석재표면처리를 목적으로 개발하였기 때문에 고압펌프시스템과 고압수 분사장치인 노즐분사제어장치로 구분하였다.



<그림 5> 노즐이 석재표면에 요철을 형성하는 궤적에 대한 평면도

3.1 고압펌프 시스템

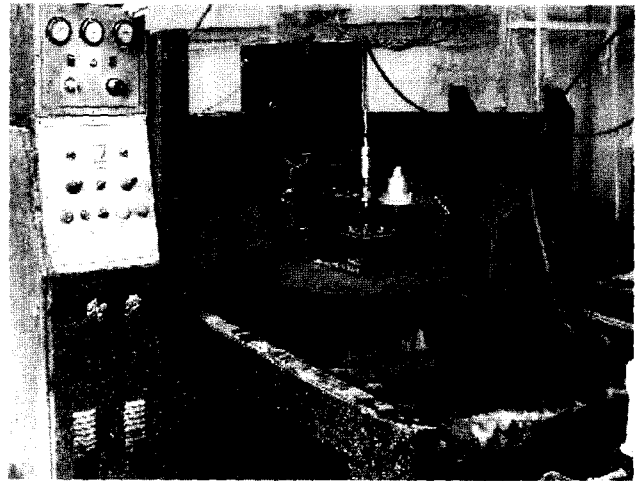
고압펌프 시스템은 중압기를 통해 입력수를 압축하여 고압수를 만들고 이를 고압호스를 통해 운송하여 최종적으로 노즐을 통해 분사하는 기능과 관련된 모든 시스템을 말한다. 본 연구에서는 <그림 6>에서와 같이 Flow사의 HUSKY S-200 모델로서 디젤 엔진을 탑재한 대용량의 고압펌프를 사용하였으며, 최대 분사압력 40,000 psi(2,729 bar), 최대유율 24 l/min, 엔진용량 205 Hp으로써 플랜저 형식의 펌프이다[3]. 또한 본 시스템은 전기전원이 없는 작업 현장에서도 사용 가능한 디젤 형태로서 초고압수를 이용하여 석재 표면을 요철함에 따라 기존의 고압펌프보다 물 사용량을 대폭 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.



<그림 6> 고압펌프시스템

3.2 노즐분사(초고압수) 제어장치

워터젯 시스템에서 고압수의 최종분사를 담당하는 노즐 어셈블리는 여러 가지 형태의 이송수단에 따라 작업자가 직접 작업하는 건(gun) 노즐분사 형태와 구동장치에 장착되어 클리닝작업 또는 재료의 절단작업 등에 사용되는 노즐분사 형태가 있다. 본 연구에서의 노즐분사 제어장치는 구동장치에 고정되어 좌우 x-축 방향으로 이동하게 된다. 가공대상의 석재는 이동 컨베이어장치 위에 탑재되어 y-축 방향으로 이동하면서 석재표면을 요철하게 된다. 이 제어장치는 석재표면에 요철을 하기 위해 특별히 설계, 제작된 이동식 노즐분사 제어장치로서 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 노즐분사 제어장치

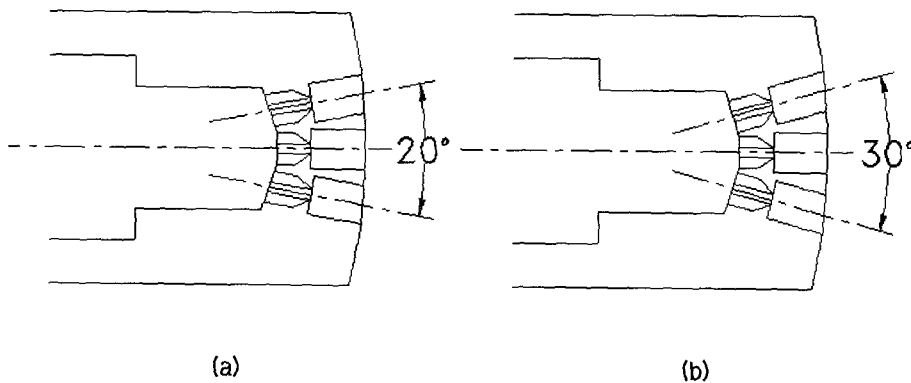
3.3 노즐비트의 형상 및 운동

<그림 8>은 3개의 분사노즐을 가진 노즐비트의 모식도를 보여주고 있는데, 그림에서 (a)는 두 개의 외곽수 사이의 분사각도가 20°인 경우를 나타내고 (b)는 30°인 경우를 나타낸다. 비트의 중심부에 있는 노즐에 의한 중심수의 분사각도는 두 경우에 모두 0°이다. 노즐비트의 직경에 따라 석재표면에 형성되는 거칠기 모양이 달라지므로 중요한 역할 담당하고 있다. 본 개발 장치에서는 노즐비트의 직경은 다양하게 교체 가능하며 노즐의 외경이 0.008인치이다.

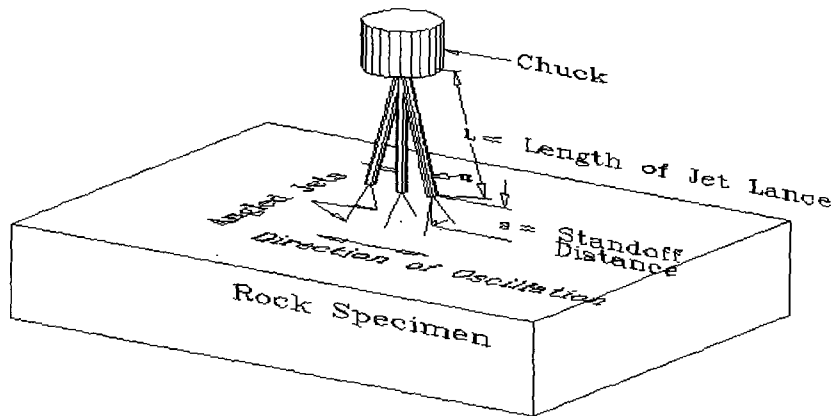
<그림 9>는 노즐(비트)의 진동운동에 대한 개념을 입체적으로 표현한 것이며, 비트의 진동방향, 이송방향, 진동각(a), 분사각(b), 이격거리(s) 및 진폭(A) 등을 나타내고 있다. 여기서 비트의 진동방향이 이동방향에 대해 직각인 경우를 보여주고 있으나 실제로 비트의 진동방향

은 이동방향에 대해 임의의 각도를 가질 수 있다. 본 연구에서는 노즐비트의 각도를 약 20°로 이동방향으로 설정하였다. 노즐비트와 대상 시료간의 이격거리는 약 20 mm 간격을 두고 스위벨에 연결된 스템이 회전함과 동시에 이동방향으로 움직이게 되면 적절한 각도를 가진 분사수가 시료에 분사되면서 석재표면을 요철 시킨다. 석재표면처리를 하는데 가장 좋은 방법은 노즐의 운동 형태에 따라 적절한 분사각과 이격거리를 설정하고 적

절한 분사각을 부여한 노즐비트를 사용하는 것이 유리하다. 따라서 본 장비의 개발 및 시험과정에서는 위에서 언급한 바와 같이 외곽 3개 분사구 사이의 각도가 20°와 30°인 노즐비트를 각각 사용하였다. 본 연구에서는 화염버너공정의 열처리 작업방법을 워터젯 시스템을 통해 생성된 고압수(2,000bar)를 압축분사방식으로 석재표면에 거칠게 요철 시키는 새로운 석재표면 가공장치를 자동화 하였다.



<그림 8> 노즐 비트의 각도



<그림 9> 노즐의 진동운동에 대한 개념도

4. 석재표면처리공정장치의 개발

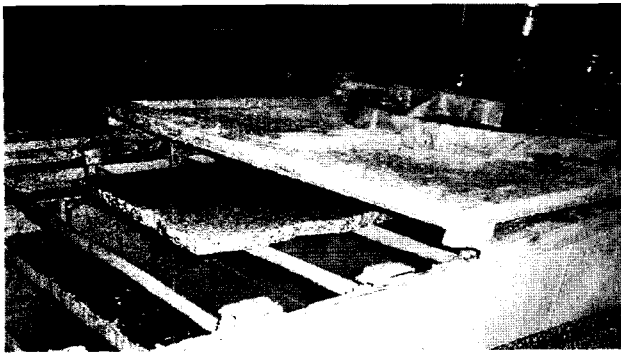
일반적으로 석재는 풍화에 대한 저항성과 보다 향상된 색상 그리고 광택을 주기 위하여 표면 처리를 한다. 표면연마는 석재의 표면을 비정질화 또는 미세정질화 함으로써 표면층의 공극을 보다 적게 할 수 있다. 외부 환경의 영향으로부터 색상이나 광택의 변화를 더욱 줄

일 수 있는 표면처리 방법은 여러 가지가 있으며, 여기에 따른 장치기술도 자동화 쪽으로 개발되어지고 있다. 또한 석재(화강암)는 재질이 단단하면서 다른 암석에 비하여 생산량이 많기 때문에 건축물 판재(내·외장재)로 많이 이용되고 있다. 건축물에 사용되는 석판재에 대한 품질특성과 직무기피요인 분석을 통해 새로운 석재표면 처리장치 설계 및 제작을 위해 TFT팀을 구성하여 브레

인스트밍 기법을 통해 다음과 같은 현업 요구사항들이 제시되었다.

- (1) 열처리를 하지 않아야 된다.
- (2) 석재는 내구성이 우수하여야 한다.
- (3) 석재표면을 균일하게 거칠게(요철)하는데 석재표면에는 미세 균열현상이 없어야한다.
- (4) 흑운모가 용착되는 현상이 없어야한다.
- (5) 석재의 본래 천연색상을 그대로 유지되어야한다.
- (6) 표면 가공시 분진이 노출기준 이하로 유지되어야 한다.

이러한 현업의 요구사항을 해결하기 위해서는 기존의 화염버너 가공방법으로는 해결할 수 없기 때문에 새로운 가공장치 개발이 필요하게 되었다. 이 장치는 워터젯 시스템을 이용하여 생성된 고압수(2,000~2,400 bar)를 압축 분사시켜 석재표면을 거칠게(요철) 형성하여 석재품을 가공시키는 시스템이다. 개발된 이 장치의 석재표면처리 개략적인 작업과정은 <그림 10>과 같다.



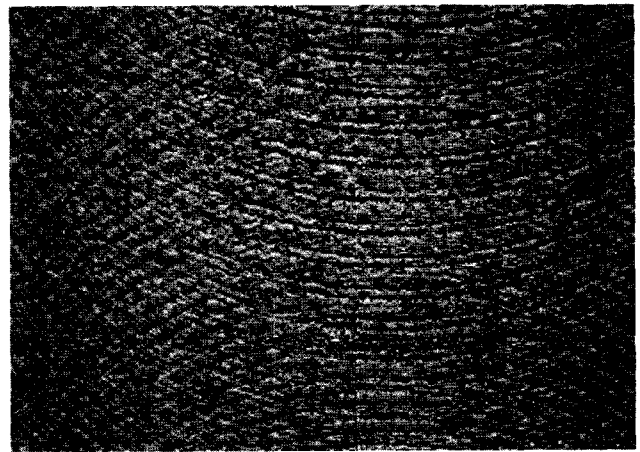
<그림 10> 워터젯 시스템에 의한 석재표면 가공장면

그림에서 가공할 석재를 이동컨베이어에 올려놓으면 y-축으로 이송되어 분사실로 진입하게 된다. 또한 초고압수(노즐제어)분사장치는 x-축(좌우)으로 이동하면서 상부에 설치된 8개의 노즐(지름 0.008인치)로부터 초당 500m 속도로 회전하면서 분사하여 석재표면을 요철을 형성하게 된다. 요철된 석재는 이동컨베이어를 타고 밖으로 나오게 한다. 노즐에서 분사된 물과 석분은 장치 밑에 있는 배수로를 통해 야외 저장탱크에 저장되며 정수된 물은 활석공정에서 재활용 할 수 있도록 하였다. 개발된 석재표면처리장치의 운영요소는 고압수의 압력, 노즐의 직경, 노즐과 대상 석재표면간의 이격거리, 노즐의 이송속도, 컨베이어의 이동속도 등 많은 요소들이 있다. 이 요소들은 운전조건에 따라 석재표면의 요철을 형성하는데 영향을 주는 요소들이다. 본 연구에서는 워터젯 석재표면처리장치의 운영조건을 다구찌 방법을 이용한 표면

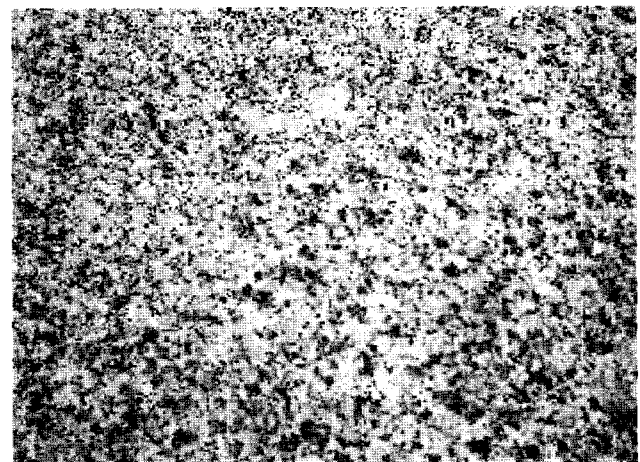
처리공정의 최적가공조건을 선정하여 석재 본래의 천연색상과 질감을 유지하면서 균열이 없고 균질한 조면마감으로 거칠게 요철 되도록 하였다[5].

5. 두 가공방법에 의한 석재 표면처리의 품질 특성 비교분석

화강암류의 황등석에 대한 실험결과 <그림 11>은 워터젯 시스템으로, <그림 12>는 화염버너 방법으로 석재 표면처리한 것을 비교한 것이다. <그림 11>에서 워터젯에 의한 방법이 암석의 천연적인 색깔과 일정한 거칠기가 조화롭게 잘 대비됨을 알 수 있다. 따라서 본 시스템은 수압을 조절함으로써 표면의 거칠기를 일정하게 조절할 수 있다는 장점도 있다.



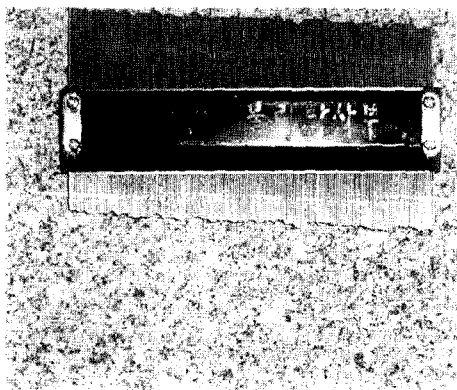
<그림 11> 워터젯 수압분사 표면처리



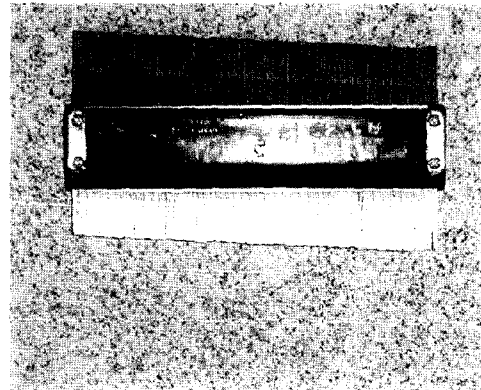
<그림 12> 화염버너 표면처리

저자들은 바닥재 및 외벽용으로 많이 사용하고 있는 화강암류의 문경석의 표면을 화염버너가공과 워터젯 시스템을 이용한 수압분사에 의하여 처리하고, 그 결과에 대한 내구성을 비교한 바 있다[4]. 그 결과 Dorry의 마모 시험에서 수압분사에 의한 것이 23.4 Ha, 화염버너에 의한 것이 18.9 Ha로서 수압분사에 의한 방법이 화염버너에 의한 방법보다 마모경도가 더 크게 나타난 것으로 분석되었다. 분석 결과로부터 수압분사에 의한 방법이 화염분사에 의한 방법보다 더 내구성이 크게 유지될 수 있음을 보고한 바 있다. 쇼아경도 비교에서는 화염분사보다 수압분사에 의한 방법이 경도가 2배 이상 크게 나타났다. 이러한 분석결과에 따라 워터젯 시스템을 이용한 수압분사에 의한 방법이 화염분사에 의한 방법보다 재료의 내구성이 더 크게 유지됨을 알 수 있었다[4]. 건축재 또는 바닥재의 경우 시공상 또는 용도상 표면에 거칠기를 두게 되는데 화염분사의 경우 거칠기가 클수

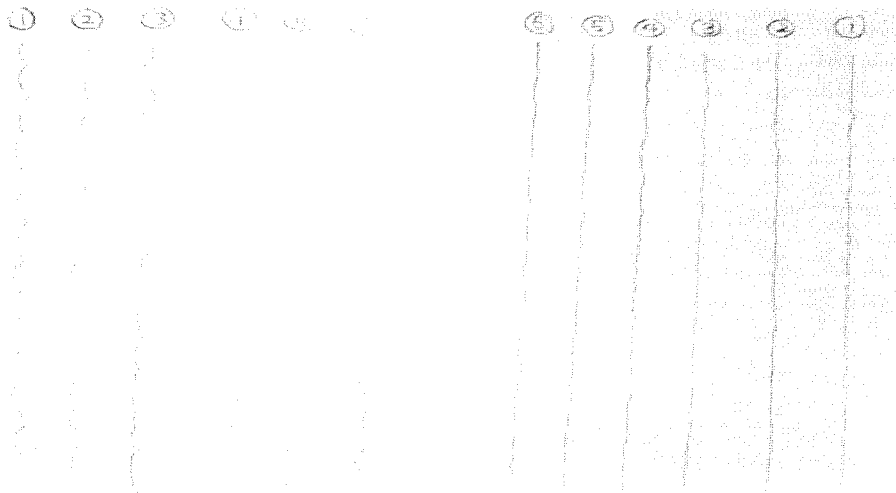
록 거기에 따르는 에너지 소비량도 많아지게 된다. 이러한 이유는 화염분사에 의한 표면의 거칠기가 석영입자에 열을 가함으로서 석영입자가 열팽창에 의하여 튀어나가면서 요철이 생성되기 때문이다. 따라서 적은 량의 에너지로 거칠기를 조절할 수 있다면 작업효율과 경제성도 향상된다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 두 방법에 대한 거칠기 측정기를 사용하여 측정하였다. 측정방법은 석판재의 각 변에서 약 5 cm 거리의 4변과 양 대각선 방향으로 2변 등 총 6회를 각각 측정하여 그 결과를 <그림 13>의 시료 하단에 나타내었다. <그림 13>에서와 같이 두 방법에 의한 거칠기는 워터젯에 의한 수압분사 방법이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 바닥재 등을 워터젯에 의한 수압분사 방법으로 가공하면 석판재 표면과 외부물체간의 마찰력 증대를 가져오기 때문에 시공 후 안전성에도 화염분사 방법에 의한 판재보다 훨씬 유리 할 것으로 사료된다.



(a) 수압분사



(b) 화염분사



<그림 13> 수압분사와 화염분사에 의한 석판재 표면의 거칠기

6. 결론 및 기대효과

기존의 석재표면처리 방법 중에서 가장 많이 사용하는 화염버너 가공작업을 워터젯 시스템을 이용한 수압 분사 방법으로 대체할 수 있는 새로운 석재표면 처리장치를 개발함으로써 석재가공업의 화염버너공정에 대한 문제점을 개선하였다. 또한 주요개선 효과는 <표 2>와 같으며 작업환경, 생산성과 품질측면에서 모두 우수한 것으로 나타났다. 특히 분진은 획기적으로 감소되었으며, 고압산소와 LPG 등에 의한 재해발생 유해인자를 완전히 제거함으로써 작업환경이 대폭 개선되었다. 기존 화염버너 작업보다 생산성은 4배가 향상되었고, 작업인원 소요도 절반으로 감소되는 효과를 기대할 수 있게 되었다. 그리고 석판재의 품질측면에서 내구성 등이 더 크게 유지된 것으로 나타났다. 또한 적은 에너지로 표면의 거칠기 조절이 가능해짐으로서 워터젯에 의한 수압 분사 방법이 화염분사 방법보다 더 경제적인 것으로 사료된다. 따라서 최근에 개발된 워터젯 시스템을 이용한 수압분사 방법이 화염버너 방식보다 석재료의 표면처리 기구로서 석제품의 내구성 등이 우수하여 석재 클레임의 잠재요인을 개선할 수 있는 대안으로 제시될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 워터젯 시스템을 이용하여 개발된 석재표면처리장치와 석재표면처리방법 그리고 이 장치에 의해 제조된 석재에 대하여 실용신안(제0296525호)으로 등록하였다.

참고문헌

- [1] 대한광업진흥공사, “석재산업의 이해와 실태”, 1999.
- [2] 이동수, “석재응용의 이론과 실무”, 한빛문화출판, 2000.
- [3] Husky S-200 Power Unit Operation & Service Manual, FLOW international corporation, 1994
- [4] 강지호, 장명환, “워터젯 수압분사와 화염버너에 의한 석판재 표면처리의 품질특성 비교연구”, 안전경영과학회지, 제5권, 1호, 2003
- [5] 강지호, 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 석재 표면처리공정의 최적표면가공조건 선정에 관한 연구”, 안전경영과학회지, 제5권, 1호, 2003
- [6] 대한광업진흥공사, 석재자원 특성 조사보고 1호, pp.130, 1989.
- [7] 여인옥, 전용원, “화강암의 열팽창 특성에 관한 연구”, 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 263-275, 1992.
- [8] 이형원, 신재섭, “화강암질 석재의 열과괴 특성연구”, 한국자원공학회지, Vol. 27, pp.31-42, 1990.

<표 2> 화염버너공정과 워터젯에 의한 효과분석 비교

구분	비교항목	화염버너	워터젯 시스템	효과분석
작업환경	소음	97dB	89dB이하	노출기준 이하
	분진	3.7mg/ m ³	0.25mg/ m ³	14.8배 저감
	LPG, 산소	사용	사용안함	완전제거
생산성	생산성	0.5 m ² /min	2.0 m ² /min	4배 향상
	인원	0.5 m ² /min	1.0 m ² /min	1/2배 감소
품질	마모경도	18.9 Ha	23.4 Ha	내구성우수
	색상	석영입자가 감소로 색상 변질	화강암 천연색 유지	화강암 자연색 유지
	거칠기	보통	증대	거칠기 조절 가능
	외부마찰력	보통	증대	안정성 증대