

## 워터젯 수압분사와 화염버너에 의한 석판재 표면처리의 품질특성 비교연구

- Comparison Study on Quality Characteristics of Surface  
Treatment of Stone Board Materials by Water-jet System  
and Flame-burner -

강지호 \*

Kang Ji Ho

장명환 \*\*

Jang Myoung Hwan

### Abstract

To comparison the surface treatment methods of stone board materials, the results of Dorry's abrasive test were 23.4 for water-jet system and 18.9 for flame-burner system. Therefore abrasive hardness, the stone board materials by the water-jet system was greater than one by flame-jet system. As a result of Shore's hardness test, the stone board materials by water-jet system was twice greater than one by flame-jet system. Authors carried out microscopic observation to survey a defection of the composition minerals for two methods, but all of the both methods have not founded a defection.

Therefore, the stone board materials by water-jet system was greater durability than one by flame-jet for the surface treatment methods.

---

\* 군장대학 산업경영과 교수

\*\* 대한광업진흥공사 자원개발처 과장

본 연구는 2002년도 중소기업청 직무기피요인해소사업비 지원에 의해 연구되었음

## 1. 서론

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. 외부환경의 영향으로부터 색상이나 광택의 변화를 더욱 줄일 수 있는 표면처리 방법은 여러 가지가 있으며, 여기에 따른 장치기술도 자동화 쪽으로 개발되고 있다.

화염버너작업은 특수 채색효과와 울퉁불퉁하고 투명한 효과를 보이며 공기 중에서 일어나는 화학적 풍화와 기계적 풍화를 막는데 도움이 된다. 화염버너작업은 석재표면을 거칠게(요철) 하는 작업으로 가열에 따른 석재 구성재의 열응력에 따른 석재표면의 미세 균열현상과 열에 의한 흑운모가 용착되어 석재 품질의 저하 요인으로 대두되기도 한다[6]. 이러한 화염버너 작업은 고온고압의 LPG 또는 아세틸렌 화염을 사용하여 석영성분 등을 떨어져 나가게 하기 때문에 원래의 석판재가 3 mm정도 두께가 감소된다는 단점도 있다.

또한 석재표면 작업시 소음과 분진이 노출기준을 초과하고 있으며, 고열취급에 따른 화상, 파편타박상 등 재해위험이 매우 높은 공정으로 안전상의 문제가 되기 때문에 버너공정에 대한 개선의 필요성이 제기 되었다. 따라서 전시한 문제점을 보완하기 위해서 워터젯 시스템을 이용한 석재표면 처리장치를 개발한 바 있다[1].

본 장치는 워터젯 시스템을 통해 생성된 고압수(2,000~2,400 bar)를 압축 분사시켜 석재표면에 요철을 형성하여 석제품을 가공시키는 기계이다.

본 연구의 목적은 석재 표면처리의 여러 가지 방법 중에서 최근에 개발된 워터젯 시스템을 이용한 수압분사에 의한 방법과 가장 많이 이용하고 있는 기존의 화염버너 분사방법에 대한 석판재 표면처리의 품질특성을 비교분석하고자 한 것이다.

## 2. 화염버너가공

화염버너가공을 보통 제트버너 또는 자동버너처리라고 하며 화성압계열의 표면처리에 사용한다. 분사되는 고온의 불꽃에 의하여 독특한 가공면을 형성한다. 화염온도는 약 1800~2000 ℃로 석재표면을 가열하여 열에 의한 팽창으로 암석표면의 광물을 통겨내며 요철면을 형성하는 기계로 가공면을 냉각수로 세정시키고 다시 규사 또는 탄화규소 등을 물과 섞은 혼합액을 고압으로 불어서 표면의 빛깔과 촉감을 좋게 한다.

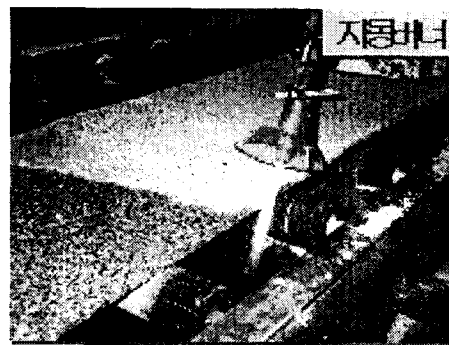
직경 4.7 mm의 노즐에서 압축공기와 LPG 천연가스가 연소되어 분출되면서 표면두께를 2.0~2.5 mm로 돌 표면을 불어낸다. 자동(제트)버너용 판재의 두께는 최소 40~50 mm를 요한다[6].

화염버너 작업은 석재표면을 가열 열팽창으로 암석 표면의 광물을 통겨내어 요철면

을 얻는 작업방법으로 <그림 1>과 같이 토치에 의한 수동작업 방법과 <그림 2>와 같이 PLC를 이용한 자동버너 방법이 있다[2][4].



<그림 1> 수동 버너작업

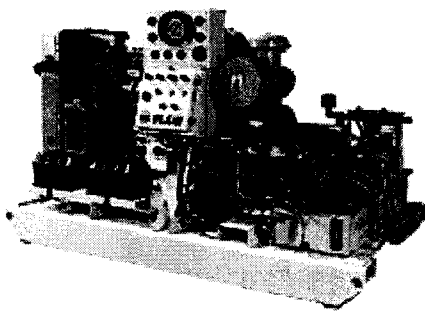


<그림 2> PLC 자동버너작업

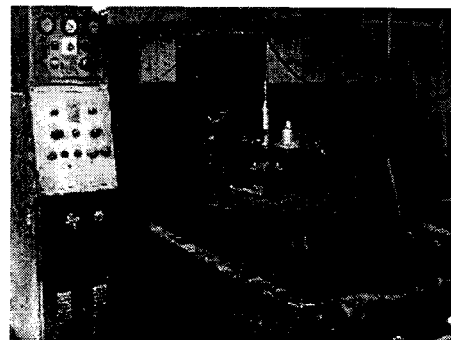
### 3. 워터젯 시스템을 이용한 석재표면가공 장치

워터젯 시스템(water-jet system)은 고압수의 생성단계에서 시작하여 최종단계인 분사에 이르는 전체 과정에서 직접적으로 관계된 모든 장비들과 그 응용에 따라 달라지는 모든 부대장비들을 말한다[10].

이미 워터젯 시스템은 타 산업분야에서 다양하게 사용해 왔다. 석재산업에서도 자원을 보다 효율적으로 암석채취, 절단하기 위해 사용 중에 있으나 석재표면처리에는 현재까지 활용하지 않고 있다. 워터젯 시스템은 그 응용 목적과 필요에 따라 여러 가지 방식으로 구분할 수 있으나 석재표면 처리장치에서는 <그림 3>과 같은 고압펌프 시스템과 <그림 4>와 같은 초고압수 분사장치인 노즐분사 제어장치로 구분한다.



<그림 3> 고압펌프 시스템



<그림 4> 노즐분사 제어장치

고압펌프 시스템은 증압기를 통해 입력수를 압축하여 고압수를 만들고 이를 고압호스를 통해 운송하여 최종적으로 노즐을 통해 분사하는 기능과 관련된 모든 시스템을 말한다. 본 석재 표면처리 가공장치의 고압펌프 시스템은 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 Hp 로써 플랜지 형식의 펌프를 사용하였다[10].



<그림 5> 석재표면을 가공하여 나오는 장면

노즐분사 제어장치는 구동장치에 고정되어 좌우로 x-축 방향으로 이동하게 된다. 이 제어장치는 석재표면에 요철을 하기 위해 특별히 설계, 제작된 이동식 노즐분사 제어장치에 해당된다. 고압펌프시스템과 초고압수 분사장치인 노즐분사 제어장치로 구성된 석재 표면 가공장치는 워터젯 시스템을 통해 생성된 고압수(2,000~2,400 bar)를 압축 분사시켜 석재표면에 요철을 형성하여 석제품을 가공시키는 기계이다. 이 장치의 석재 표면처리 개략적인 작업과정은 <그림 5>와 같이 가공할 석재를 이동컨베이어에 올려 놓으면 일정속도로 y-축으로 이송되어 분사실로 진입하게 된다.

또한 초고압수(노즐제어)분사장치는 x-축(좌우)으로 이동하면서 상부에 설치된 8개의 노즐직경이 0.008인치로부터 500 m/sec의 속도로 회전하면서 분사하여 석재표면에 요철을 형성하게 한다. 요철된 석재는 이동컨베이어를 타고 밖으로 나오게 된다. 노즐에서 분사된 물과 석분은 장치 밑에 있는 배수로를 통해 야외 저장탱크에 저장되며 정수된 물은 활석공정에서 재활용 할 수 있도록 하였다.

## 4. 실험 대상재료의 특징

### 4.1 시료선정

석재료는 내구성이 우수하여야 한다. 내구성이란 외부에서 작용하는 변화 요인과 접하면서 생기는 저항력으로 암석이 가지고 있는 고유 물성이 일정기간 유지될 수 있는 능력이다. 내구성에는 내후성, 내산성, 내열성, 내동결성 등 다양하나 석재의 형태나 가공방법, 사용지역의 기후, 작업방식, 사용방법에 따라 영향을 받는다.

표면이 고르고 광택이 있는 암석은 표면이 거친 암석보다도 외부에서 작용하는 원인에 대해 더 오래 저항할 수 있다. 일반적으로 습윤한 지역이 건조한 지역보다도 암석의 풍화가 빨리 진행된다. 내구성이 가장 좋은 암석은 석영반암, 화강암, 섬장암, 조면암, 반결정질 석회암이며, 보통인 암석은 결정질 석회암, 석회 규산질 사암이고, 내구성이 적은 암석은 연한 석회암이나 점토질 석회암 등이다.

본 연구에서는 석재료의 표면을 화염버너처리와 워터젯 시스템을 이용한 수압분사에 의하여 처리하고, 그 결과에 대한 내구성을 비교하고자 바닥재 및 외벽용으로 많이 사용하고 있는 화강암류의 문경석을 이용하였다.

### 4.2 시료의 암석학적 특징

문경석은 중조립질의 석영, K-장석 및 사장석등이 주 구성원이며 소량의 흑운모와 미량의 백운모, 인회석, 저콘, 스펀, 알라나이트 및 형석 등이 부성광물로 수반되는 화강암이다. 석영은 대체로 조립질 타형으로 매우 약한 파동소광과 봉합조직을 보여주며 국부적으로 K-장석 내에서는 미분상 조직을 또한 사장석 내에서는 미르메케틱 조직을 보여준다. K-장석류는 orthoclase-perthite로 대체로 조립질로 산출하며 비교적 심한 고령토화 작용을 받았다. 사장석은 대체로 중립질로서 부분적으로 누대구조를 보여주며, 또한 부분적으로 건운모화, 방해석 및 고령토화 작용을 받았다. 흑운모는 대체로 중립질로 부분적으로 녹니석화 작용을 받았다. 본 석재의 모드분석 결과는 <표 1>에 서와 같이 석영이 35%, 장석이 55%, 흑운모가 5% 정도로 분석되었다[2]. <표 2>는 화학분석결과로서 철분은 1.11% 정도로 나타났다[2].

<표 1> 모드분석 결과(%)

광물명	석영	사장석	K-장석	흑운모	백운모	건운모	방해석	녹니석	인회석	점토
합량	35	23	32	5	<0.5	1	<0.5	1	<0.5	2

<표 2> 화학분석 결과(%)

성분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
합량	76.6	13.0	0.03	0.13	0.13	4.40	3.72	0.06	1.11	0.09

### 4.3 물리·역학적 특징

<표 3>은 문경석의 물리·역학적 특성을 나타낸 것이다. 문경석은 담홍색조의 조립질 화강암으로서 쇼아경도 82 (HA), 탄성파속도 3900 m/sec, 단위중량 2.58 (g/cm<sup>3</sup>), 흡수율 0.39 %로써 조직은 그다지 치밀하지 않다.

<표 3> 물리·역학적 특성

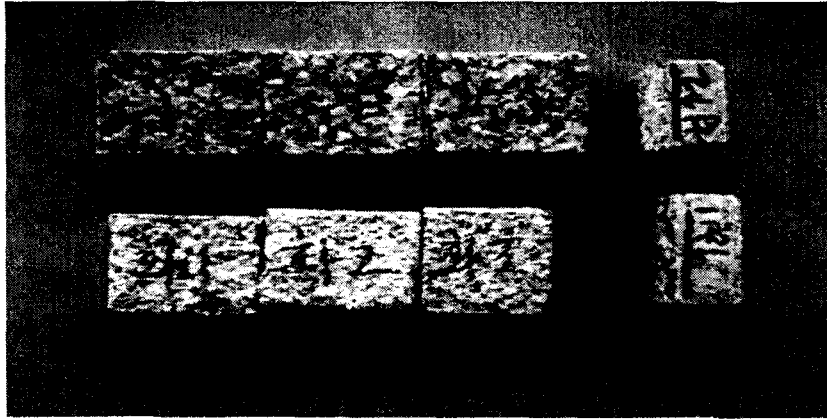
성분	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	단위중량 (g/cm <sup>3</sup> )	흡수율 (%)	P-파속도 (m/sec)	쇼아경도 (HA)	마모경도	내동결성 (%)	내산성 (%)
합량	1500	2.58	0.39	3900	82	43.4	91.7	96.3

그러나 본 석재는 11.5 cm의 충격 저항성과 1500 kg/cm<sup>2</sup> 정도의 강도저항성을 나타내는 등 각종 강도특성이 우수한 수준이고, 마모저항성이 크기 때문에 내부 건축재 중 바닥재, 벽재, 계단재로써 많이 이용되고 있다[2].

## 5. 분석결과

### 5.1 시료의 표면처리 결과

<그림 6>은 워터젯 시스템을 이용한 수압분사와 화염버너 방법으로 표면 처리한 시료이다. <그림 6>에서 수1, 수2, 수3은 수압분사, 화1, 화2, 화3은 화염버너 방법에 의한 것이다. 시료표면의 외관상 조사에서 수압분사에 의하여 표면 처리한 석판재는 석영입자가 표면에 불록하게 노출되었고, 화염 처리한 석판재의 표면은 석영입자가 오목하게 빠져나가고 장석성분이 노출된 것이 육안으로도 확인된다.



<그림 6> 두 방법 의하여 표면처리된 시료

<그림 6>에서 약간 검은 부분이 석영입자이고 하얀부분이 장식 성분이다. 이러한 원인은 석재료가 화염에 대해 견디는 힘이 대단히 큰 것으로 생각되지만 실제로 석재를 가열하면 광물마다 열팽창률이 다르고 상변화를 일으키기 때문이기도 하다. 또 입자가 큰 광물을 포함하는 석재는 광물마다 열적 성질의 차로 응력이 발생하여 저절로 파괴되는 경우도 있다. 이러한 열파괴 거동을 규명하기 위하여 Friedman과 Johnson은 Sioux 규암을 685 °C까지 가열 냉각 후 형성된 열 균열을 광학 현미경과 주사 전자현미경을 통하여 관찰한바 암석은 고유한 임계 열파괴 온도( $T_c$  : critical threshold temperature)에서 열파괴가 개시되고 그 후 온도 증가시 열파괴가 진행된다고 발표하였다[9]. Bruner는 열파괴시 입자내 균열은 인접 광물간 열팽창 차에 의하여 그 방향과 크기가 결정된다고 발표하였다[8]. 여인옥과 이형원에 의하면 화강암은 573 °C 부근에서 석영입자가 전이하여 부피가 팽창하기 때문에 광물의 결합이 파괴되어 결국 크랙(crack)등이 발생된다고 보고한 바 있다[3][4].

본 연구에서도 화염버너로 표면처리 할 경우 장식보다 상대적으로 열팽창 계수가 큰 석영이 화염버너의 열응력에 의하여 떨어져 나가고 표면에는 장식질이 남은 것으로 분석되었고, 수압분사에 의한 방법에서는 경도가 상대적으로 적은 장식이 떨어져 나가고 표면에 석영의 입자가 남는 것이 육안으로 분석되었다.

## 5.2 마모경도 비교

경도란 굽힘이나 절단, 비트, 조각 등에 대한 저항도를 말한다. 물론 천공작업이나 마모작업에 대한 저항도를 말하기도 한다. 암석의 경도는 상대적인 경도와 경도계에 의한 경도로 크게 구분한다. 상대적 경도는 광물간 굽힘 여부로 서로의 굳기를 비교한

것으로 인소경도라 하며 모스경도가 가장 많이 쓰이고 있다. <표 4>는 모스경도를 나타낸 것이다. 일반적으로 화강암은 석영과 정석으로 구성되어 있으므로 모스경도는 6~7정도이다.

<표 4> 모스경도

번호	광물명	비교	번호	광물명	비교
1	활석(talc)	흑연	6	정장석(orthoclase)	창유리, 줄, 자철석
2	석고(gypsum)	손톱, 암염, 황	7	석영(quartz)	
3	방해석(calcite)		8	황옥(topaz)	
4	형석(fluorite)	동전, 백운석	9	강옥(corundum)	텅스텐합금
5	인회석(apatite)	손칼날	10	금강석(diamond)	

모스경도와 더불어 석재에서 사용되고 있는 경도는 마모경도, 반발경도 등이 있다. 마모경도 측정은 Dorry의 마모시험기를 사용하여 측정하고 있다.

시험방법은 50×50×25 mm 크기의 3개 1조의 시료를 60 mesh의 카보런덤을 뿌린 판 위에 올려 2 kg의 하중, 45 rpm속도로 회전원판을 225번 회전시켜 무게 손실을 측정하여 Atkinson이 제안한 식으로 구한다[7].

$$Ha = \frac{10G(2000 + W_s)}{2000 W_{loss}} \quad (1)$$

(1)식에서 G는 체적비중  $W_s$ 는 시험전후의 산술평균 중량,  $W_{loss}$ 는 손실된 시험편의 무게이다.

<표 5> 마모시험 결과

시료번호	체적비중	시험전중량 (g)	시험후무게 (g)	$W_{loss}$	$W_s$	Ha
수-1	2.60	141.45	140.32	1.13	140.89	24.63
수-2	2.60	140.46	139.20	1.26	139.83	22.08
수-3	2.60	131.88	130.70	1.18	131.29	23.48
화-1	2.60	118.14	116.69	1.45	117.42	18.90
화-2	2.60	121.83	120.35	1.48	121.09	18.63
화-3	2.60	120.25	118.81	1.44	119.53	19.13

<표 5>는 석판재에 대한 Dorry의 마모시험 결과를 나타낸 것이다. 표에서 수압분사에 의한 석판재가 23.5, 화염분사에 의한 석판재가 18.9로서 수압분사 방법이 화염분사 방법보다 마모경도가 더 컸다. 이 결과로부터 수압분사 방법이 화염분사 방법보다 더 내구성이 크게 유지됨을 알 수 있다. 따라서 두 석재표면처리 가공방법에서 워터젯을

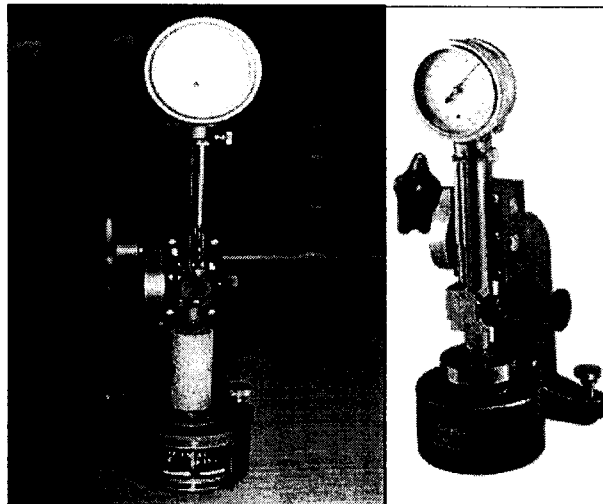


이용한 수압분사 방법이 석재의 품질면에서 더 우수한 것으로 판명되었다.

### 5.3 쇼아경도 비교

쇼아경도 측정은 <그림 7>과 같이 Type D 쇼아경도 측정기(Imai seiki)를 평탄한 면 위에 고정시키고 수평을 유지한 다음 표면을 #325이상 연마한 시험편을 이동시키며 20~30회 측정하여 평균수치를 기록한다.

본 연구에서는 두 방법에 의한 표면의 경도를 측정하기 위하여 시편의 표면을 연마하지 않고 각 시험편 전체를 균질하게 20회씩 타격한 값을 평균하였다. <표 6>은 쇼아경도 실험치를 나타낸 것이다.



<그림 7> 쇼아 경도기

<표 6> 쇼아경도 실험치

구분	화염버너분사			워터젯 수압분사		
시료번호	화-1	화-2	화-3	수-1	수-2	수-3
실험치	23.5	25.0	22.5	49.5	48.0	50.0

그 결과 화염분사에 의한 방법보다 수압분사에 의한 방법이 경도가 2배 이상 크게 나타났다. 또한 수압분사에 의한 시료는 석영립이 블록한 형태로 표면에 많이 나와 있

으나, 화염분사에 의한 방법은 석영이 떨어져 나감으로서 오목한 형태로 장석이 남아 있어서 쇼아경도 차가 많이 나는 것으로 분석되었다.

이러한 분석결과로부터 워터젯 시스템을 이용한 수압분사 방법이 화염분사 방법보다 재료의 내구성이 더 크게 유지되며 바닥재로 사용시 외부에서 유입되는 찌꺼기 등을 쉽게 제거할 수 있는 것으로 판단되었다.

#### 5.4 현미경 관찰

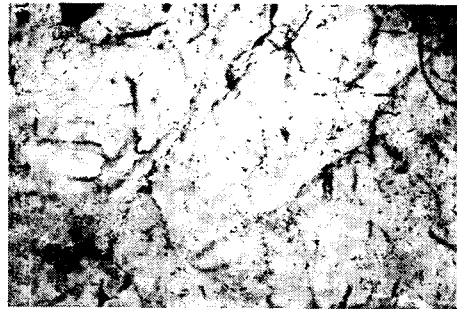
이형원[5]은 열응력하 암석의 열파괴를 조사하기 위하여 주사현미경을 이용하였다. 그 결과 화강암에 대한 반복 가열을 하였을 때 임계 열파괴 온도 이후 구형 결정모델에 따른 폭 1  $\mu\text{m}$  내외의 취성적 입자 경계균열의 형성이 먼저 관찰되었고 3  $^{\circ}\text{C}/\text{분}$ 의 속도로 600  $^{\circ}\text{C}$ 까지 온도증가에 따라 그 폭이 3~81  $\mu\text{m}$ 까지 확대되는 것으로 보고한 바 있다. 이 방법은 일정한 온도로 설정 온도까지 지속적으로 온도를 상승시키고 실험온도에서 열구배를 제거하기 위하여 2~3시간 동안 설정 온도로 유지한 것이다.

본 연구에서는 두 방법에 의한 석재의 손상여부를 조사하기 위하여 편광 현미경하에서 각 결정체를 조사하였다. <그림 8>~<그림 11>까지는 워터젯 시스템과 화염버너 분사 방법으로 처리한 석재표면을 박편으로 제작하여 석영과 장석을 편광현미경하에서 촬영한 것이다. <그림 8>~<그림 11>까지 현미경 사진에서 가로 전체 길이는 1.2 mm 이다.

<그림 8>, <그림 10>의 석영에서 작은 선형들은 close nicol과 open nicol을 비교한 결과 어떤 인위적인 크랙이나 결함이 아닌 자연상태의 광물의 거칠기 등인 것으로 판단되면, <그림 9>, <그림 11>에서 장석입자들의 선형은 같은 방법에 의하여 결정간의 경계부분을 이루는 것으로 판단되었다.

따라서 편광현미경 관찰결과 두 방법 모두 열충격과 수압분사에 의한 명확한 크랙이나 광물의 결함 등은 발견되지 않았다. 이러한 이유는 화염버너가 1800  $^{\circ}\text{C}$  이상의 불꽃을 석판재에 분사하였으나 열충격을 주지 않을 정도로 한 곳에 장시간 집중되지 않고 일정 속도로 움직이면서 상대적으로 열팽창 계수가 큰 석영입자를 떼어 내기 때문인 것으로 사료된다.

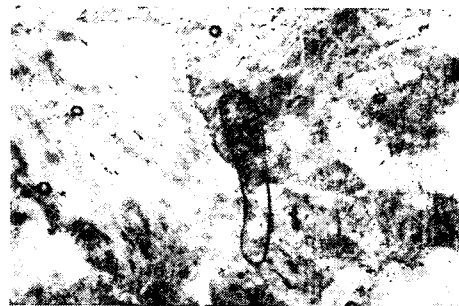
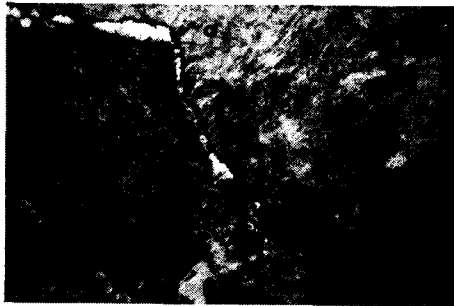
수압분사 또한 고압의 물분사를 하지만 광물입자에 집중 응력을 일으킬 정도의 큰 압력을 한 곳에 주지 않기 때문에 상대적으로 약한 장석 입자가 떼어져 나가고 석영 입자만 남기 때문인 것으로 사료된다.



(a) (close nicol×100)

(b) (open nicol×100)

<그림 8> 수압분사에 의하여 표면 처리된 석영입자



(a) (close nicol×100)

(b) (open nicol×100)

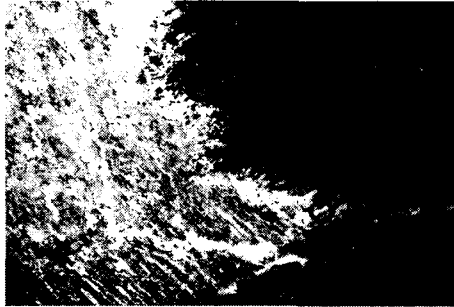
<그림 9> 수압분사에 의하여 표면 처리된 장석입자



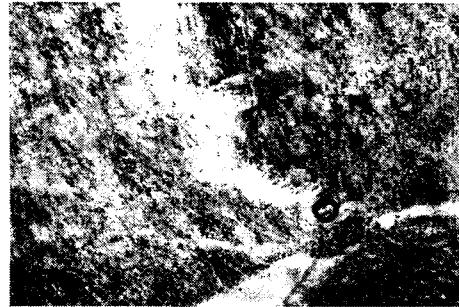
(a) (close nicol×100)

(b) (open nicol×100)

<그림 10> 화염분사에 의하여 표면 처리된 석영입자



(a) (close nicol×100)



(b) (open nicol×100)

<그림 11> 화염분사에 의하여 표면 처리된 장식입자(open nicol×100)

## 6. 결과

석재표면 처리장치로써 워터젯 시스템에 의한 수압분사와 화염버너분사 방법을 비교 분석하기 위하여 두 방법에 의한 석판재에 대하여 마모경도, 쇼아경도 및 구성광물에 대한 현미경 관찰을 실시하였다. 석판재의 품질특성에 관한 비교분석 결과 수압분사가 화염분사 방법보다 석재의 내구성이 더 크게 유지된 것으로 분석되었으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 두 방법에 의한 시료표면의 외관상 조사에서 수압분사에 의하여 표면 처리된 석판재는 석영입자 표면에 불록하게 노출되었고, 화염 처리한 석판재의 표면은 석영성분이 오목하게 빠져나가고 장식 성분이 노출된 것이 육안으로 확인되었다.

(2) 두 방법에 의한 시료에 대하여 Dorry의 마모시험결과 수압분사가 23.5, 화염버너가 18.9로서 수압분사 방법이 화염버너 방법보다 마모경도가 더 큰 것으로 분석되었다. 따라서 수압분사 방법이 화염분사 방법보다 더 내구성이 크게 유지됨을 알 수 있다.

(3) 석판재에 대한 쇼아경도 측정결과 화염분사 방법보다 수압분사 방법이 2배 이상 경도가 크게 나타났다. 또한 수압분사에 의한 시료는 석영립이 불록한 형태로 표면에 나와 있으나, 화염분사에 의한 방법은 석영이 떨어져 나감으로서 오목한 형태로 장식이 남아 있어서 쇼아경도 차가 많이 나는 것으로 분석되었다.

이러한 것으로부터 수압분사에 의한 방법이 화염분사에 의한 방법보다 재료의 내구성이 더 우수한 것으로 분석되었다.

(4) 두 방법에 의한 석재의 손상여부를 조사하기 위하여 각 시료에 대한 박편을 만들어 편광 현미경하에서 각 구성광물을 조사하였다. 그 결과 두 방법 모두 열충격과 수압분사에 의한 결정의 결함은 발견되지 않았다. 이러한 이유는 화염버너가 1800 °C 이상의 불꽃을 석판재에 분사하나 열충격을 주지 않을 정도의 일정한 속도로 움직이면서 화염을 분사하고, 수압분사 또한 한 곳에 집중압력을 주지 않을 정도로 일정한 속도로 움직이기 때문에 인 것으로 사료되었다.

따라서 최근에 개발된 워터젯 시스템을 이용한 수압분사 방법이 석재료의 표면처리 기구로서 기존 화염버너 방식보다 석재료의 내구성 등이 우수하여 석재 클레임의 잠재요인을 개선할 수 있는 대안으로 제시되었다.

## 7. 참고문헌

- [1] 강지호, "워터젯 시스템을 이용한 석재표면 처리장치의 개발", 산업경영시스템학회지 2003년도 춘계학술논문집, 미출간
- [2] 대한광업진흥공사, 석재자원 특성 조사보고 1호, pp.130, 1989.
- [3] 여인옥, 전용원, "화강암의 열팽창 특성에 관한 연구", 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 263-275, 1992.
- [4] 이형원, 신재섭, "화강암질 석재의 열파괴 특성연구", 한국자원공학회지, Vol. 27, pp.31-42, 1990.
- [5] 이형원, 이정인, "고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구", 한국암반공학회지 Vol. 5, pp. 22-40 1995.
- [6] 이동수, "석재응용의 이론과 실무", 한빛문화출판, 2002.
- [7] Atkinson, R.H., Bamford, W.E., Broch, E., Deere D.U., "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks", Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 15(3), 1978, pp.89-98
- [8] Burner, S.J. and Handin, J., "Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800 °C", Rock Mech. and Rock Eng., Vol.16, 1983, pp.181-198
- [9] Friedman, M. and Johnson, B., "Thermal crack in unconfined Sioux Quartzite", Proc. 19th US Symp. on Rock Mech., 1987, pp.423-43.
- [10]. FLOW international corporation, "Husky S-200 Power Unit Operation & Service Manual". 1995

## 저 자 소 개

**강 지 호** : 한양대학교 산업공학과에서(공학사, 공학석사), 명지대학교 산업공학과 박사 학위를 취득하였으며, 현재 군장대학 산업경영과 교수로 재직중이다. 주요 관심분야로는 TQM, Q-cost, QFD, ERP, CALS 등이다.

**장 명 환** : 전남대학교 자원공학과에서 공학사, 공학석사와 공학박사를 취득하였으며, 대한광업홍공사 기술연구소 선임연구원, 익산사업소 과장 등을 역임하고, 현재자원 개발처 과장으로 재직중이다. 주요관심분야는 품질공학, 암반내 방사성폐기물 처리기초 연구분야, 암반구조물 설계 및 안정성 평가, 암반공학문제의 수치해석 등이다.