

작업환경개선을 위한 석재연마공정에 있어서의 다축마석연마장치 개발

- Development of the multi axis whetstone system in the stone polishing process for the work environment improvement -

강 지 호 *

Kang Ji Ho

홍 동 표 **

Hong Dong Pyo

Abstract

A multi axis whetstone polishing system, which uses the flow system of the stone polishing machine head, has been developed. The test results show that the defect by line contact polishing does not occur in both ends of the stone and that it came to trim smoothly. In terms of the surface roughness, the corresponding index was decreased by 3.6 times, improving the polishing effect greatly. It decreased significantly the dust and noise with the wet polishing. The factors of the duty evasion at production site can thus be solved with the work environment improvement against the polishing process of the stone industry and work intensive reduction.

Keyword : 석재표면가공, 헤드 유동장치, 다축마석연마장치, 표면거칠기

† 본 연구는 2004년도 중소기업청 직무기피요인해소사업비 지원에 의해 연구되었음

* 군장대학 산업경영과 교수

** 전북대학교 기계항공시스템 공학부 교수

1. 서론

석재가공업은 대부분의 사업장이 근로자수가 10인, 연간 생산액은 약10억원 미만으로 영세하고, 소음과 분진이 다량 발생하며, 중량물 및 고열 취급으로 작업환경이 아주 열악하다. 또한 사업주와 근로자 모두 안전보건의식이 낮고, 이직률이 타 업종에 비해 매우 높은 대표적인 3D(Dirty, Difficulty, Dangerous)업종이다[1].

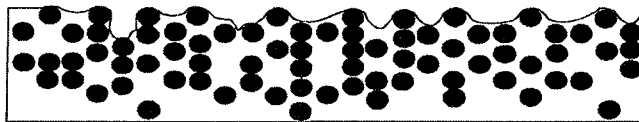
석재가공업의 석재표면을 매끄럽게 다듬거나 거칠게 다듬는 표면가공공정은 석재 고유의 색상과 내구성을 유지시켜주는 중요한 단계로서 연마, 화염버너, 워터젯 등의 가공방법이 있다[2]. 특히 석재표면을 다듬을 때 소음과 분진이 노출기준을 초과하고 있으며 또한 고열취급에 따른 화상, 파편타박상 등 재해위험이 매우 높은 공정이라고 인식되어 석재가공업체로 취업하기를 기피하고 있는 실정이다[3]. 따라서 석재가공업계에서는 인력확보에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 난관을 극복하기 위하여 업체 자체의 지속적인 체질개선의 노력이 시도되고 있으나 그 한계에 직면해 있는 상황이다. 3D산업 중의 하나인 석재 표면 다듬는 가공공정의 특성상 열악한 작업환경이 그 주된 요인으로 작용하고 있다. 1980년 이후 국내의 건설경기 활황 및 건축물 고급화에 따라 꾸준한 석재 수요의 증가로 석제품의 표면가공기술은 진일보를 가져왔다. 그러나 아직도 많은 석재가공업체들은 기존의 재래식 방법인 수동연마와 화염버너작업으로 석재 표면을 다듬질하고 있다. 이 작업방법은 작업자가 직접 분진 및 소음, 화염에 노출되는 재해위험 및 중량물을 이송하는 고된 작업까지 병행하고 있어 노동강도 또한 타 제조업에 비해 높은 편이다[3]. 워터젯 시스템에 의한 표면을 다듬는 공법은 최근 제안된 방법으로서 화염버너방법을 대체하였으며 석재표면에 고압의 살수를 가함으로서 상대적으로 굳기가 약한 장석이 나 다른 광물들을 표면에서 떼어내는 방법으로서 소음과 분진을 획기적으로 감소시켰다[2,5]. 특히 화염버너작업은 암석의 조암광물들의 열팽창 차이를 이용 석재의 표면을 고온 처리하여 석영질 입자를 튀어내는 방법이다. 이 가공방법에 사용되는 석재의 두께를 최소 30mm 고려하여야하기 때문에 박판재 생산은 불가능하다[4]. 이와 같이 많은 단점이 있는데도 불구하고 화염버너작업을 많이 채택하고 있는 이유는 석재표면 다듬는 작업이 아주 간단하고 다듬는 장치가 저렴하기 때문이다[3]. 따라서 화염버너방법을 대체할 수 있는 마석연마방법은 석재 연마기 헤드의 연마숫돌 유동장치와 워터젯 감지식 위치제어장치에 대한 국내 기반연구의 한계로 인하여 마석다축연마방식을 사용하지 않고 있으며 일부 업체에서는 수동 및 메탈연마방법을 제한적으로 사용하고 있는 실정이다. 수동 및 메탈연마기는 직경이 최대 12인치 크기의 메탈 다이아몬드 디스크 연마재로 석재 표면을 직접 면 접촉방식으로 연마작업을 하다보니까 석판재의 양끝에 호랑이 무늬 형태가 발생되어 품질 저하요인으로 지적되고 있다. 또한 메탈연마기에서 마무리 광택작업은 약 100℃열을 발생시켜 광택을 내는 열광택으로 건식연마이기 때문에 다량의 분진을 발생시키고 있다.

본 연구에서는 화염버너작업과 수동 및 메탈연마작업의 열악한 작업환경을 개선하고 수가공 인력을 대체할 수 있도록 공정을 자동화하고 작업자의 안전을 보장하고 석재의

품질과 생산성을 증가시킬 수 있는 석재 연마기 헤드의 연마숫돌 유동장치를 이용한 다축마석연마장치 개발에 역점을 두었다.

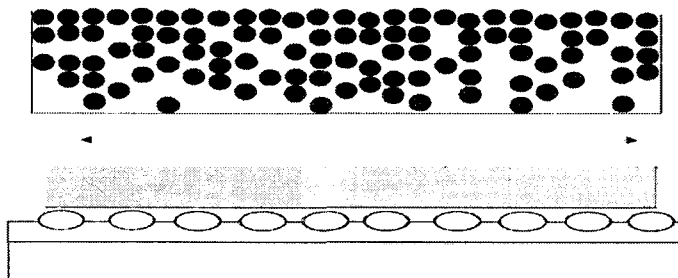
2. 석재 표면처리공정 분석

석재는 압축강도와 내화성, 내마모성이 크고 종류가 다양하며 산지나 조직에 따라 각각 다른 외관, 색조를 나타내며 장중한 멋이 있어 경제규모가 향상되면서 최근 건축물의 내외장 마감재로 채택하는 경향이 현저하게 증가하고 있다. 그러나 건물의 장중한 멋을 줄 것으로 기대했던 석재로 마감한 건물들이 시간이 경과함에 따라 얼룩지거나 곰팡이 발생 등으로 보기 흉한 모습을 보여 석재 오염방지에 대한 연구도 시급한 실정이다. 이와 같이 석재로 건물 외장을 마감한 건축물의 석재 외장재의 경우 곰팡이 오염이 크게 증가하고 있는 이유는 건축용 외장재 석재표면의 조면(粗面) 다듬는 작업을 대부분 화염버너처리로 하기 때문이다. 특히 이 방법은 <그림 1>과 같이 석재 구성입자 중 장석성분을 노출시키고 석영입자는 오목하게 빠져나간다. 오목한 부분으로 빗물과 바람 등이 쉽게 흡수됨으로써 온도의 변화가 심할 때 수축팽창이 가속화되어 파손되는 부위가 크게 늘어나는 구조적인 단점이 있다. 또한 화강석의 판재인 경우 곰팡이로 인해 변색과 위생상, 미관상 등의 각종 문제를 야기하고 있으며 특히 석재오염을 세척할 때는 제2의 환경오염을 발생시키고 있어 새로운 사회문제로 대두되고 있는 실정이다.



< 그림 1 > 화염버너처리로 다듬는 석재표면 모습

연마에 의한 석재 표면 다듬는 작업은 외부풍화에 가장 크게 저항할 수 있는 방법으로 연마과정을 통하여 기공이 막혀짐으로 방수처리가 이루어진다. <그림 2>와 같이 석재의 표면을 비정질화 또는 미세정질화함으로써 표면층의 공극을 보다 적게 할 수 있어 훼손되는 일이 없으며 세척으로 인한 2차 석재오염을 감소시킬 수 있다[4].



< 그림 2 > 연마방법으로 다듬는 석재표면 모습

연마가공은 석재 표면에 광택을 내는 가장 고전적이고 안전한 방법이다. 수동 및 메탈 연마기는 최대 직경 12인치 메탈 다이아몬드 디스크 연마재와 레진패드를 사용하여 석재의 표면을 습식연마와 건식연마로 하는 방법이다. 기존 메탈연마기는 평면절삭은 습식연마로 광택연마는 브로워로 물을 제거한 다음 건식연마를 하게 된다. 광택판을 석재표면에 고속 회전시키면서 약 100℃의 열을 발생시켜 광택을 내는데 열에 의해 석분진이 탄 상태로 변해 석재표면이 원색보다 약간 어둡게 변하며 다량의 분진이 발생하게 되는 단점이 있다. 따라서 기존 메탈연마기 단점을 보완하여 새로운 마석연마기는 연마숫돌을 사용하여 석재의 표면을 전부 습식 연마를 하기 때문에 분진을 획기적으로 감소시켜 작업환경을 크게 개선할 수 있다.

수동연마기 및 메탈연마기는 메탈연마재를 시각체로 이루어지고 메탈을 고정구에 끼워져 사용되므로 메탈 디스크 면을 그대로 석재표면에 밀착시킨 후 연마기 헤드를 회전시키면 연마재의 일측면이 석재표면과 그대로 면 접촉하게 된다.

기존 메탈연마기는 면 접촉이 이루어지게 되므로 부하가 많이 걸리고 석재표면을 과도하게 갈아내어 매끄러운 연마가 안되며 또는 양쪽으로 흠이나 편마모 현상이 발생되어 품질저하요인 지적되어 경제성 및 효율성이 떨어져 제한적으로 이용되고 있는 실정이다. 이러한 문제점들이 화염버너처리방법을 선호하는 요인으로 지적되고 있다.

따라서 기존 석재표면을 다듬는 화염처리와 수동 및 메탈연마기의 작업방법을 대체하여 현장직무기피요인을 해소하고 연마효과가 뛰어난 새로운 석재 연마기 헤드의 연마숫돌 유동장치와 원터치감지위치제어장치를 이용한 마석연마기 개발이 시급하다.

3. 다축마석연마장치의 개발

마석연마가공작업은 다양한 종류 석재의 표면처리가 가능하며 표면을 다듬을 때 발생하는 소음과 분진을 획기적으로 감소시키고 화염버너처리를 대체함으로써 LPG와 고압산소의 재해발생취급물질을 근본적으로 제거할 수 있다.

본 연구에서는 석재연마기 헤드의 연마숫돌 유동장치와 원터치감지식 위치제어장치에 의해 일련의 연속자동연마작업이 가능한 다축마석연마장치를 개발한다. 따라서 석재가공업의 현장직무기피요인을 해소하고 화염처리로 가공한 석재를 사용한 후에 발생하는 2차 오염을 방지하며, 생산성과 품질향상 및 원가절감으로 석재산업을 경쟁력있는 산업으로 육성하고 생산현장으로 인력유입을 촉진할 수 있다.

3.1 석재연마기 헤드의 유동장치

다축마석연마장치는 헤드의 연마숫돌 유동장치 하부에 부착된 4개 연마숫돌을 편심돌기로 좌,우 유동시켜 석재표면과 중앙으로 양쪽에 약5도의 등근 연마숫돌이 선 접촉으로 표면 연마가 가능하도록 설계한다. 연마헤드의 편심돌기가 형성된 워휠 고정체와 결합시켜 워휠이 왕기어를 타고 회전하도록 설계한다. 숫돌연마 교환이 편리하고 삽입 체결방식을 채용하여 생산성을 높인다.

연마효과를 극대화하기 위해 새로 개발된 다축마석연마장치는 편심돌기가 형성된 워휠을 워휠 고정체에 결합시켜 워휠 고정체가 헤드의 몸체와 함께 회전되게 하고 워휠이 결합된 워기어는 고정시켜 워휠이 워기어를 타고 회전되게 하며 워휠의 편심돌기에는 연결링크를 통하여 회전체를 좌, 우 유동시키게 하고 회전체에 구조에 의거 연마숫돌을 좌우 유동시킬 수 있도록 하였다[3].

이 마석연마기는 본체가 좌우로 암이 회전하므로 석판재위에서 마석연마재가 원호를 그리면서 선 접촉연마를 하게 된다. 따라서 석재와 마석연마재는 선 형태로 석재표면을 가공하기 때문에 석재의 양끝에는 전혀 스크래치가 발생하지 않아 매끄럽게 다듬어지고 표면거칠기 값이 낮아 연마 광택을 얻을 수 있다.

3.2 원터치감지식 위치제어장치

기존 개별감지식 위치제어방식은 감지리미트를 스펀들 하부 두줄 컨베이어벨트 중간에 여러 개를 설치하였다. 석제품이 컨베이어벨트를 타고 개별감지리미트의 위치를 지날 때 마다 개별감지로 각각 헤드가 작동하여 연마작업을 수행하는 방식이다.

이 개별감지식 위치제어방식은 연마가 불필요한 석재부분은 미리 절단한 후에 연마작업을 실시하기 때문에 절단가공시간이 필요하고 작업에 많은 불편을 초래하였다.

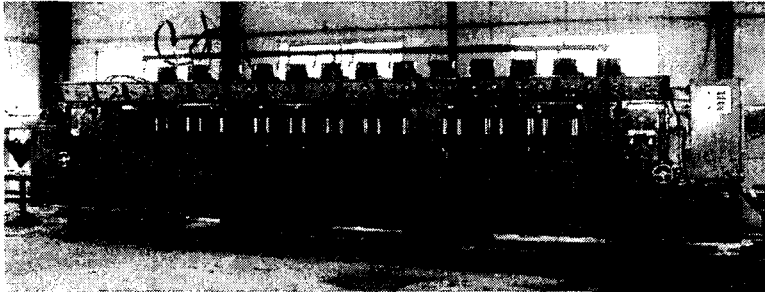
본 연구에서는 연속연마작업이 가능한 원터치감지식 위치제어방식을 고안하여 석재를 같이 양끝 2곳에서 동시 감지하도록 함으로써 절단하지 않고 연마작업을 할 수 있어 절단작업시간이 필요 없으며 석제품손실이 적어 생산성과 원가절감이 가능하다. 원터치감지식 위치제어방식은 석제품이 컨베이어벨트로 이동될 때 PLC에 미리 감지리미트에서 1번 헤드부터 10번 헤드까지의 거리를 미리 입력하여 프로그램을 만들고 석제품이 이동하면 감지리미트가 자동 감지하여 프로그램에 의하여 자동으로 연속연마작업이 가능하도록 설계하였다.

3.3 다축마석연마장치의 개발

연마숫돌의 좌우 유동을 안정적으로 작동시킬 수 있는 석재연마기 헤드의 연마숫돌 유동장치와 원터치감지식 위치제어장치를 이용한 새로운 다축마석연마장치를 개발함으로써 석재의 내구성을 증대시키고, 생산성과 품질향상, 오염방지, 소음과 특히 분진을 획기적으로 제거시킬 수 있다.

< 그림 3 >은 실제 개발완료하여 석재가공업 생산현장에 설치한 다축마석연마장치이며 가공할 석재를 캐비넷 앞의 컨베이어벨트에 올려놓으면 일정속도로 이송되어 원터치감지위치제어장치가 PLC로 각각 1번부터 10번 헤드까지의 거리를 입력하여 프로그램을 만든다. 석제품이 연마실로 진입되면 입력된 프로그램에 따라 각각 용도별로 헤드의 연마숫돌 유동장치에 부착된 금강석 연마숫돌이 편심돌기로 회전하면서 석재표면을 매끄럽게 다듬질한다. 매끄럽게 광택된 석제품은 캐비넷 밖으로 나오게 한다.

절삭공정에서 절삭된 석판재의 평활도는 보통 0.5~1.5mm의 편차가 발생되므로 바로 연마작업이 불가능하다. 따라서 1번과 2번 헤드에서 다이아몬드 연마재를 사용하여 평활도 유지를 위한 평면작업을 실시한다. 3번부터 6번 헤드에서 평면절삭마석연마작업, 7번부터 9번 헤드에서 평면갈기연마작업 그리고 10번 헤드에서는 광내기 연마를 실시한다.



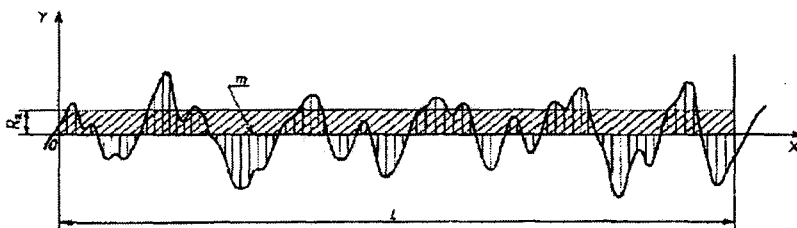
< 그림 3 > 석재연마기 헤드의 유동장치를 이용한 다축마석연마장치

4. 다축마석연마장치에 의한 석제품 품질특성 비교분석

4.1 표면처리 제품의 표면거칠기 비교

모든 공학표면(engineering surface)은 고유하게 의도된 공학적 기능을 갖고 있으며 표면의 거칠기나 고운정도, 즉 표면거칠기(surface roughness)가 공학적 기능 더 나아가서는 부품의 성능에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 표면이 매끄럽다 또는 거칠다 하는 개념은 상대적인 것이며 추상적으로 표면을 평가하는 방법이다. 흔히 표면의 매끄러운 정도를 측정하여 숫자로 개량화한 것을 표면거칠기 값이다[6].

두 물체중 어느 하나의 표면거칠기 값이 상대편보다 작다고 할 때 이는 상대편의 표면보다 더 매끄럽다는 의미이며 동일 조건일 때 빛을 비추면 더 많은 량의 빛을 반사시키게 된다. 광(光), 혹은 조도(照度)는 물체의 표면을 무엇으로 연마(polishing)했는가에 따라 달라 질수 있다. 동일한 거칠기 값이라도 금속으로 연마한 것보다 마(麻)나 세무가죽 등으로 연마하게 되면 더욱더 반짝이게 된다.

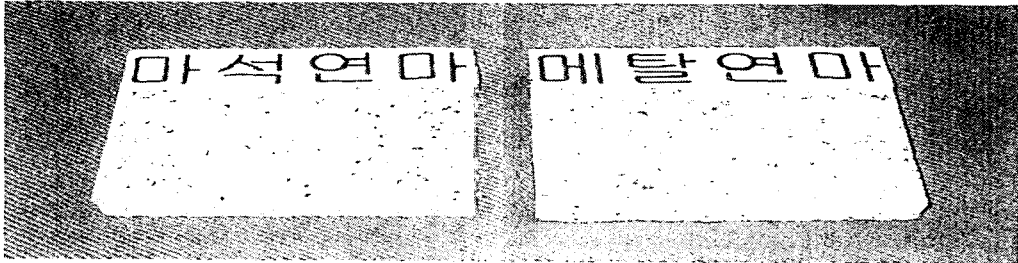


<그림 4> 평균거칠기(R_a) 구하는 방법

한국산업규격(KSB 0161)에서 표면거칠기를 나타내는 파라미터인 산술 평균거칠기 (R_a)는 <그림 4>에서 거칠기 곡선으로부터 그 평균 선의 방향에 기준 길이만큼 뽑아 내어 그 표본 부분의 평균 선 방향 X축을, 세로 배율방향에 Y축을 잡고 거칠기 곡선 $y=f(x)$ 로 나타내었을 때 다음 (1)식에 의하여 구한다. 구해지는 값을 마이크로미터(μm)로 나타낸다[6].

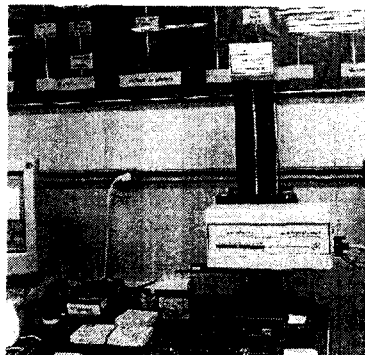
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

(1) 식에서 기준길이(l)은 거칠기 곡선으로부터 컷오프 값을 뺀 부분의 길이이며 거칠기 곡선의 평균 선(m)은 단면곡선의 표본 부분에서의 여파 굴곡곡선을 직선으로 바꾼 선이다. 본 연구에서는 황등석에 대한 석판재를 이용하여 마석연마기와 메탈연마기로 가공하여 표면거칠기 시험을 실시하였다. <그림 5>는 황등석의 판재를 보인 것이다.

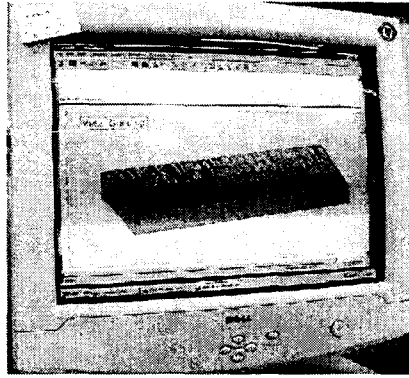


< 그림 5 > 황등석 판재

< 그림 6 >은 표면거칠기 측정기를 대표하는 것으로 촉침(stylus)을 이용하여 단면곡선, 거칠기곡선의 기록과 해석을 할 수 있는 촉침식 표면거칠기 측정기이다[7]. 확대장치, 제어장치, 기록장치로 구성되어 있으며 피 측정물표면의 매끄러운 정도에 따라 수십배에서 수천배정도의 배율로 표면의 상태를 분석한다. <그림 7>은 3차원적으로 측정된 해당 표면전체의 거칠기 값을 나타내는 3차원 평균거칠기(S_a) 값에 대한 측정결과를 컴퓨터 단말기로 나타낸 것이다.



< 그림 6 > 촉침식 표면거칠기 측정기



< 그림 7 > 3차원적으로 측정된 시편

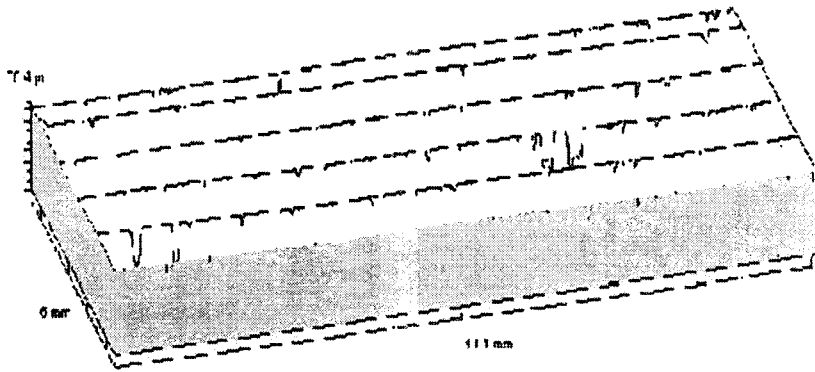
4.2 분석결과

본 측정시험에서는 < 그림 5 >와 같은 100×100×20mm의 시험편을 3개씩 준비하여 축침식 표면거칠기 측정기로 측정하였다[8]. 각 시험편의 표면을 마석연마제와 메탈연마제로 표면을 연마한 후 각 시편의 표면을 9등분하여 시편당 5 point 씩 측정한 결과를 평균하여 구하였다. < 표 1 >에서 황등석의 마석연마로 가공한 석판재는 평균거칠기가 0.412 μm 메탈연마로 가공한 석판재는 1.511 μm 로 측정되어 무려 3.6배 정도가 마석연마로 가공한 석제품이 광도가 우수한 것으로 나타났다.

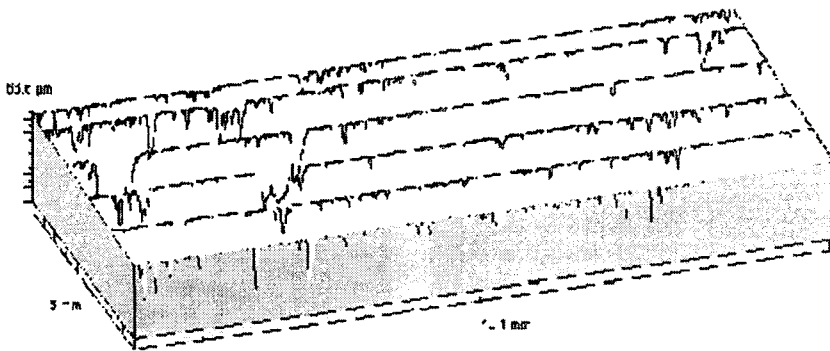
< 표 1 > 메탈 및 마석연마로 가공한 황등석의 표면거칠기 값

구분	메탈연마 측정값		마석연마 측정값	
	$R_a(\mu\text{m})$	$R_z(\mu\text{m})$	$R_a(\mu\text{m})$	$R_z(\mu\text{m})$
TRACE 1	2.654	17.61	0.147	2.76
TRACE 2	0.436	4.49	0.248	2.86
TRACE 3	2.041	15.57	0.548	8.27
TRACE 4	1.312	9.18	0.805	9.50
TRACE 5	1.111	9.20	0.314	3.56
평균	1.511	11.21	0.412	5.39

< 그림 8 >은 마석연마로 가공한 석재표면을 3차원적으로 나타냈다. 마석연마로 가공한 석재 표면전체의 3차원 평균거칠기 값(S_a)이 0.933 μm 로 분석되었다. <그림 9>은 메탈연마로 가공한 석재표면을 3차원적으로 나타낸 것이다. 전체의 석재표면 평균거칠기 값(S_a)이 2.26 μm 로 나타났다. 이와 같이 3차원적으로 석재 표면을 측정된 결과에서도 무려 2.4배로 마석연마로 가공한 석제품이 광도가 우수한 것으로 분석되었다.



< 그림 8 > 마석연마로 가공한 황등석에 대한 3차원의 표면거칠기



< 그림 9 > 메탈연마로 가공한 황등석에 대한 3차원의 표면거칠기

5. 결 론

석재연마기 헤드의 연마숫돌 유동장치와 원터치감지식 위치제어장치에 의해 일련의 연속연마작업이 가능한 다축마석연마장치를 개발하여 특허(0163939호)로 등록하였다. 선접촉 연마방식을 채택하여 석재의 양끝에 흠이 발생하지 않아 매끄럽게 다듬어졌으며, 마석연마로 가공한 석판재가 3.6배 정도로 연마효과가 크게 향상되었다. 기존 메탈 연마에서 습식 연마인 마석연마방식으로 개선되어 비산분진은 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 획기적인 감소되었으며 소음도 95dB에서 86dB이하로 감소되어 석재가공업의 연마공정에 대한 작업환경이 크게 개선되었다. 또한 주요 개선효과는 < 표 2 >와 같으며, 작업환경, 생산성, 품질측면에서 모두 우수한 것으로 나타났다. 석재의 내구성 증가에 따른 수주의 증가와 박판재 생산에 따른 원가절감과 품질향상에 크게 기대 될 것으로 예상된다.

< 표 2 > 다축마석연마장치 개발에 대한 전·후 효과 비교

구분	비교항목	개선전		개선후 (마석연마)	비고
		화염버너	메탈연마		
작업환경	소음	95dB	90dB	86dB	노출기준 이하
	분진	3.7mg/ m ³	0.25mg/ m ³	0.1mg/ m ³	2.5배 저감
	LPG, 산소	사용	사용안함	사용안함	완전제거
	노동강도	8	4	2	
생산성	생산성	300 m ² /일	90 m ² /일	180 m ² /일	2배 향상
	인원	300 m ² /일	90 m ² /일	180 m ² /일	1/2배 감소
	원석 소요량	30mm	10mm	10mm	1/3배 감소
품질	흡수율	0.255	-	0.253	황등석
	쇼아경도	53±14	-	97±5	
	마모경도	38.3Ha		43.7Ha	
	표면거칠기	-	1.511µm	0.412µm	3.6배 광도 우수
	불량률	0.5%	0.1%	-	

6. 참 고 문 헌

- [1] 대한광업진흥공사, “석재산업의 이해와 실태”, 1999.
- [2] 강지호, 장명환, “워터젯 시스템을 이용한 석재표면처리장치 개발”, 산업경영시스템 학회지, 제26권, 제3호, pp. 31-38, 2003.
- [3] 강지호, “석재표면가공시 소음과 분진감소와 재해발생 유해물질 제거장치 기술개발에 관한 연구”, 중소기업청, 2003.
- [4] 강지호, 장명환, “워터젯 수압분사와 화염버너에 의한 석판재 표면처리의 품질특성 비교연구”, 안전경영과학지, 제5권, 제1호, pp. 115-128, 2003.
- [5] 강지호, 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 석재표면처리공정의 최적표면가공 조건 선정에 관한 연구”, 안전경영과학지, 제5권, 제1호, pp. 103-113, 2003.
- [6] 한국산업규격(KS B 0161), “표면거칠기 정의 및 표시”, 한국표준협회, 1999.
- [7] 구자복, “표면거칠기 측정이론과 실제”, 중소기업진흥공단, pp. 47-64, 1999,
- [8] 강지호, 장명환, “연마와 화염버너로 가공한 석판재의 품질특성 비교연구”, 안전경영과학회지, 2004년 추계학술대회, 미출간.

저 자 소 개

강 지 호 : 한양대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사와 명지대학교 산업공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 현재 군장대학 산업경영과 교수로 재직중이다. 주요 관심분야로는 TQM, Q-cost, QFD, ERP, CALS 등이다.

홍 동 표 : 한양대학교 정밀기계공학과에서 공학사, 한국과학기술원 기계공학과에서 공학석사와 한양대학교 기계공학과에서 박사학위를 취득하였으며, 미국 PURDUE에서 Post-Doctor, 현재 전북대학교 기계항공시스템공학부 교수로 재직중이다. 주요 관심분야는 소음, 진동 및 제어, 기계설계 등이다.