

다구찌 방법을 이용한 석재표면처리공정의 최적표면가공조건 선정에 관한 연구

- The Optimal Parameter Design of the Stone Surface Process Using the Taguchi Method -

강 지 호*

Kang Ji Ho

조 용 욱**

Cho Yong Wook

박 명 규***

Park Myung Kyu

Abstract

A study to analyze and solve problems of a stone surface process experiment has presented in this paper. We have taken Taguchi's parameter design approach, specifically orthogonal array, and determined the optimal levels of the selected variables through analysis of the experimental results using S/N ratio.

1. 서 론

우리나라의 석재가공업은 업체당 매출액이 연간 10억원 수준이고, 대부분의 사업장이 근로자수가 10인 미만으로 영세하고 작업환경 매우 열악하다[1]. 석재가공업에 대한 각 공정별의 재해취급유해물질과 재해발생유해인자, 작업방법은 <표 1>과 같다. 석재가공은 원석입고, 절단, 석재표면처리가공(버너, 연마), 재단, 포장 등의 공정을 거쳐 대부분이 건축석판재와 도로경계석 등을 주로 생산하고 있다.

* 군장대학 산업경영과 교수

** 인덕대학 산업시스템경영과 교수

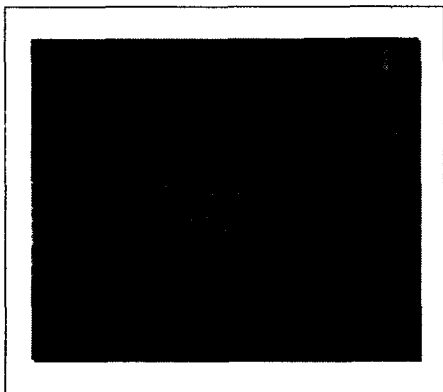
*** 명지대학교 산업공학과 교수

본 연구는 2002년도 중소기업청 직무기피요인해소사업비 지원에 의해 연구되었음

<표 1> 석재가공업의 재해취급유해물질과 재해발생유해인자

공정명	원석투입	절단	표면처리가공		재단	포장/출하
			연마	버너		
사용설비	지게차	절단기	연마기	버너기	재단기	-
재해취급 유해물질	-	-	-	LPG, O ₂	-	-
재해발생 유해인자	중량물	소음, 중량물	소음, 분진	소음, 분진, 고온	소음	중량물
작업방법	지게차를 이용 원석을 절삭기에 투입	절삭기에 의한 규격별로 절단	석재표면을 매끄럽게 다듬는 작업	석재표면을 거칠게(요철) 다듬는 작업	재단기에 의한 규격별로 재단	석제품을 포장 후 출하

우리나라에서 석재표면처리가공은 전통적인 인력다듬기와 근래에 보급된 전동공구를 이용한 기계다듬기가 있으며 현재에는 이러한 표면처리가공을 보다 경제적으로 가공하기 위하여 LPG 버너 가열방법이 가장 많이 사용되고 있다[2]. 근래의 전동공구기계 다듬은 석공작업의 노력을 다소 경감시켜주는 정도이지 현대화된 공법이 되지 못하고 있는 실정이다. 특히 버너공정은 화염온도 약 1,800~2,000℃로 돌 표면을 가열하여 열에 의한 팽창으로 암석 표면의 광물을 튕겨내어 요철면을 얻는 작업방법으로 토치에 의한 수동작업 방법<그림 1>과 PLC를 이용한 자동버너 방법<그림 2>이 있다.



<그림 1> 수동 버너작업



<그림 2> PLC 자동버너작업

사용원료는 압축된 산소와 아세틸렌 또는 프로판 가스를 혼합하여 사용하고 있다. 좀더 발전된 자동버너 방법은 가공속도 빨라서 많은 물량을 단시간에 처리할 수 있

기 때문에 대형공사의 마감에 많이 채택되고 있다. 그러나 버너공정은 가열공법에 의한 석재표면을 요철하는 과정에서 석재구성재의 열응력에 따른 석재표면의 미세 균열현상과 열에 의한 흑운모가 용착되어 석재 품질의 저하 요인으로 대두되고 있으며, 프로판가스의 소모량이 많은 단점을 갖고 있다.

또한 석재표면 작업시 소음과 분진이 노출기준을 초과하고 있으며, 고열취급에 따른 화상, 파편타박상 등 재해위험이 매우 높은 공정이라고 인식되어 석재가공업체로 취업하기를 기피하고 있어 버너공정에 대한 개선의 필요성이 제기되었다. 따라서 버너공정의 열처리 작업방법을 워터젯 시스템을 이용한 표면처리 작업방법으로 대체할 수 있는 석재표면가공장치를 자동화로 개발하였다. 이 장치의 개발로 소음과 분진이 감소되었으며 재해발생유해물질이 제거됨에 따라 쾌적한 작업환경으로 바뀌었으므로 현장직 무기피요인을 해소할 수 있었다. 버너가공과 워터젯 가공에 대한 장단점 비교를 <표 2>에 제시하였다.

<표 2> 버너가공과 워터젯 가공 장단점 비교

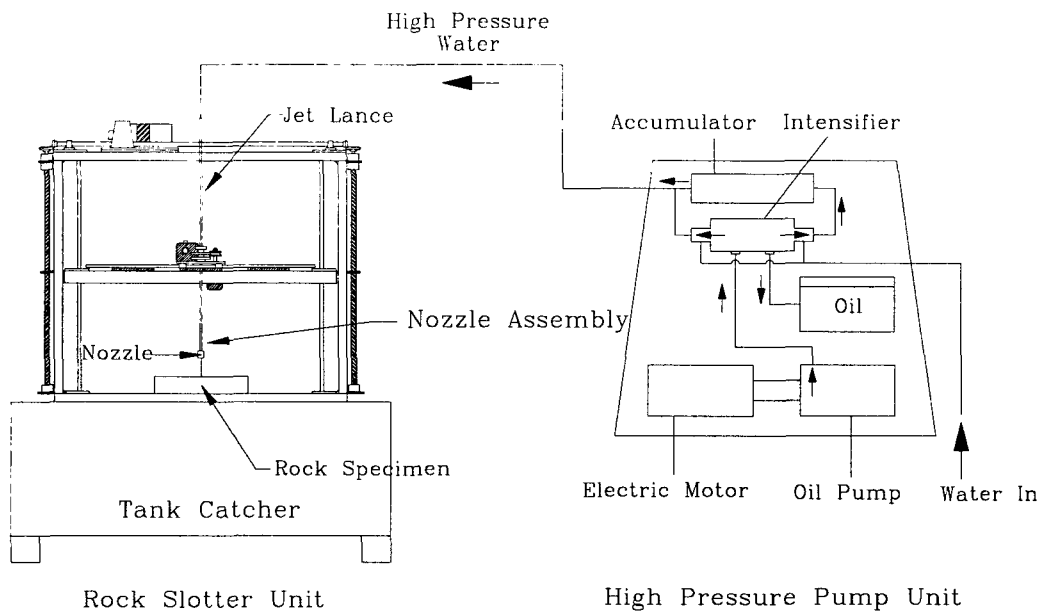
내용	버너 가공	워터젯 가공
공법원리	· 고열가열로 석재표면 팽창에 의한 박락 불규칙 가공	· 초고압의 물을 분사하여 석재 표면가공
적용대상	· 화강암에 한함	· 모든 석재에도 가능
표면 안정성	· 가열에 인한 물성변화와 석재 표면에 미세균열 형성	· 석재의 고유물성 자연 그대로 유지
마감면의 질감	· 불규칙하고 석영등이 녹아 유리처럼 광택 형성부분이 발생	· 균일하고 까실까실한 다듬이 되고 원석자연 그대로 유지
마감면의 색상	· 1800~2000℃열에 의한 가열 표면의 석영등은 팽창 박락 되고 하부에 있는 석영등은 결정질로 응고됨 · 흑운모는 열에 강하여 표면에 용착됨 · 가공후의 색상이 원석보다 더 어두운 색으로 변화됨	· 석재표면의 광물 중 충격에 약한 흑운모 등이 박락됨 · 색상은 원석과 동일한 색상을 유지됨 · 품질은 균일화 됨
가공속도	· 0.5 m ² /분	· 1.0~2.0 m ² /분
재해발생 유해인자	· 위험, 화상, 파편타박상 · 소음(96~98)dB · 분진(3.0~3.7mg/m ³)노출 기준 초과	· 재해위험없음 · 소음(90dB이하) · 분진(0.25mg/m ³)
재해발생취급 유해물질	· LPG, O ₂	· 취급하지 않음

따라서 본 연구의 목표는 개발된 석재표면처리장치를 효율적으로 활용하기 위하여 위

터젯 시스템의 운영조건을 다구찌방법으로 이용하여 최적 석재표면가공조건을 선정하고자 한다.

2. 석재표면처리장치의 개요

워터젯 시스템(Water Jet System)은 일반적으로 고압수의 생성단계에서 시작하여 최종단계인 분사에 이르는 전체 과정에서 직접적으로 관계된 모든 장비들과 그 응용에 따라 달라지는 모든 부대장비들을 말한다[9]. 워터젯 시스템의 개념은 <그림 3>과 같이 간단하게 나타내었다.



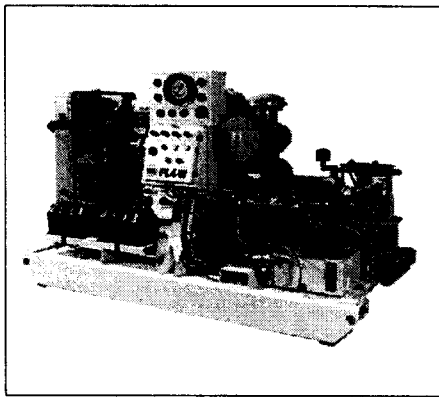
<그림 3> 워터젯 시스템의 구성도

워터젯의 유형은 연속식, 연마재 투입식, 캐비테이션식(Cavitation fluid jet), 펄스식(Pulsed fluid jet)의 4가지 기본 유형이 있다. 압력과 흐름(flow)의 크기, 즉 수력(hydraulic power)에 따라 연속식 워터젯을 형성시키는 펌프에는 플랜저 펌프(plunger pump)와 증압기 펌프(intensifier pump)의 두종류가 있다.

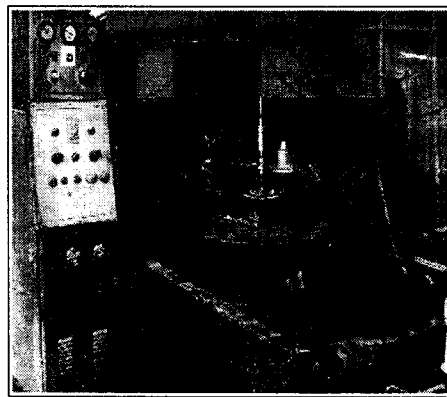
플랜저 형식에서는 노즐이 물의 흐름을 제한함으로써 고압수 운송회로에 압력이 걸리면서 고압이 형성된다. 워터젯 시스템은 그 응용목적과 필요에 따라 여러가지 방식으로 구분할 수 있다. 이미 워터젯 시스템은 타 산업분야에서 다양하게 사용해 왔다. 국

내에서도 워터젯 시스템이 사용되고 있는 대표적인 응용분야로는 각종 불순물의 제거, 도막, 녹, 콘크리트 등의 표면 박리 제거에 활용되고 있다. 석재산업에서도 자원을 보다 효율적으로 암석채취, 절단하기 위해 사용 중에 있으나 석재표면처리에는 현재까지 전혀 활용하지 않고 있다.

본 석재표면처리장치는 크게 고압펌프시스템<그림 4>과 고압수 분사장치인 노즐분사 제어장치<그림 5>로 구분할 수 있다.



<그림 4> HUSKY S-200모델

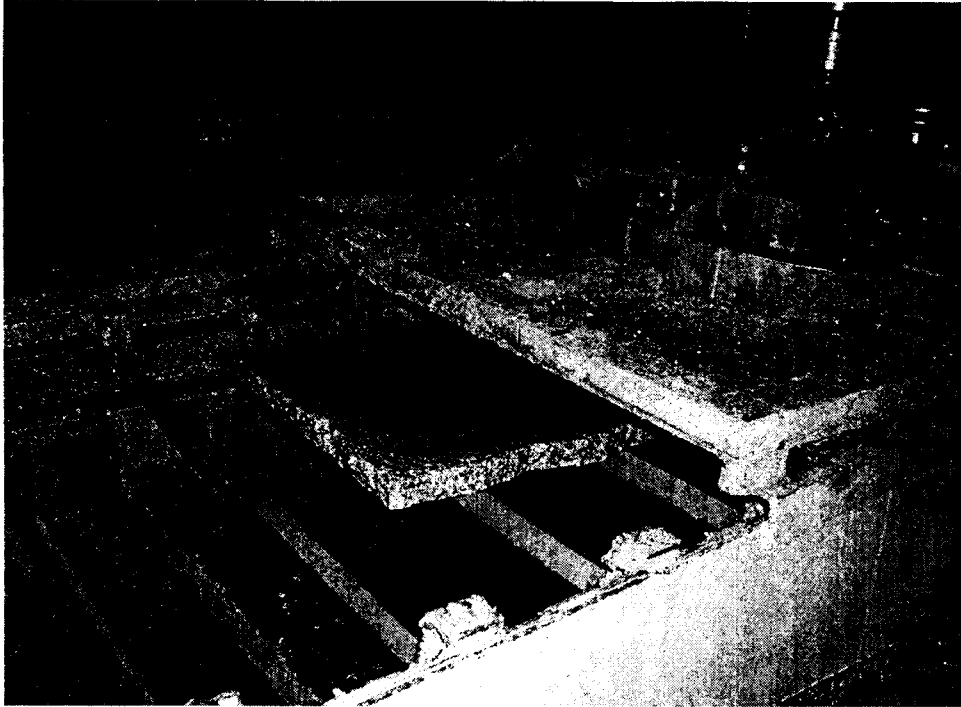


<그림 5> 노즐분사 제어장치

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

이 장치의 핵심인 초고압 프랜져 펌프는 물을 최대 4,000psi 까지 가압하여 지름 0.008 인치 노즐분사제어장치는 회전하면서 초당 500m의 속도로 분사하여 석재표면을 요철을 형성하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 석재표면가공장치를 개발함으로써 석재의 내구성을 증대시키고, 생산성과 품질향상 특히 분진을 획기적으로 감소시킬 수 있었다. 이 장치로 요철한 석재의 표면은 신발이 미끄러지는 것을 방지하거나, 자연적인 분위기를 표출하기 위하여 판재 표면에 인위적으로 요철을 만들어 이용하고 있다. 이 장치의 석재표면처리 개략적인 작업과정<그림 6>은 가공할 석재를 이동컨베이어에 올려놓으면 일정속도로 이동되어 분사실로 진입되는데 이때 노즐제어 분사장치를 고정하여 상부에 설치된 8개의 노즐로부터 초고압수가 분사되어 석재표면을 요철시킨다. 이때 분사받은 석재의 요철표면에는 약간의 석분이 쌓이게 되는데 후실에 설치된 석분세척장치에 의해 쌓인 석분은 제거되면 석재는 이동컨베이어를 타고 밖으로 나오게 한다. 노즐에 의해 분사된 물과 석분은 장치 밑에 있는 배수로를 통해 야외 저장탱크에 저장되며 정수된 물은 활석공정에서 재활용 할 수 있도록 하였다.

석재표면처리장치에 있어서 운영요소는 석재를 요철시키는데 있어서 임의로 변경시킬 수 있는 운영상의 매개변수를 의미한다.



<그림 6> 석재표면을 가공하여 나오는 장면

따라서 본 연구에서는 고압수의 압력, 노즐의 직경, 노즐과 대상 석재표면간의 이격거리, 노즐의 이송속도, 컨베이어 이동속도 등 많은 요소들이 있다. 이와 같은 요소들을 석재표면의 요철을 형성하는데 영향을 주는 요소이기 때문에 집중적인 관리가 필요한 실정이다.

3. 다구찌방법을 이용한 석재표면가공조건 선정

황등석 및 포천석 등에 대한 석재 본래의 천연색상과 질감을 유지하면서 균열이 없고 균질한 조면마감이 되기 위한 석재표면가공의 최적조건을 찾기 위해 5개의 제어인자를 선정하여 실험하였다. 5개의 제어인자 중에 A인자는 노즐의 직경 따라 3개의 수준, B인자는 고압수의 압력에 따라 3개의 수준, C인자는 노즐과 석재표면의 이격거리에 따라 3개의 수준, D인자는 컨베이어 이동속도에 따라 3개의 수준, E인자는 노즐의 이송속도 역시 3개 수준으로 나누어 실험하였다. 5개의 제어인자와 제어인자의 각각의 수준은 <표 3>과 같다.

<표 3> 제어인자와 인자의 수준

제어인자	수준		
	1	2	3
A : 노즐의 직경(인치)	0.005	0.008	0.011
B : 고압수의 압력(bar)	1900	2100	2300
C : 노즐과 석재표면의 이격거리(mm)	10	20	50
D : 컨베이어 이동속도(m/분)	0.5	1	1.5
E : 노즐 이송속도(m/분)	0.1	0.2	0.3

3.1. 실험결과의 분석

3.1.1 실험설계와 실험결과

본 실험에서의 특성치는 육안검사를 통하여 불량품과 양품 두가지로 분류한 계수치 데이터이다. 즉 어떤 실험조건에서 제품을 n개 만들어 품질검사를 실시한 결과 i번째 제품의 결과를 아래와 같이 정의를 내린다.

$$y_i = \begin{cases} 0 : \text{합격품인 경우} \\ 1 : \text{불합격품인 경우} \end{cases}$$

이 경우에는 y_i 의 값이 작은 것이 좋으므로 망소특성으로 생각하고 망소특성의 SN비 공식을 사용하여

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

을 최대로 하는 조건을 찾으면 된다. 이 공식을 사용하게 되면 y_i 는 0,1 데이터이므로

$$\begin{aligned} SN &= -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \\ &= -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \\ &= -10 \log(p) \\ &= 10 \log \left(\frac{1}{p} \right) \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 p는 시료의 불량률로서 이 p의 값이 작으면 작을수록 SN비의 값은 커진다. 본 실험에서는 각 실험조건에서 시료를 50개씩 가공하여 불량품의 수를 세어서 적은 것을 <표4>에 나타내었고, 그 값을 이용하여 SN비의 값을 계산하였다.

<표 4> 실험배치와 SN비의 값

요인배치		A	B	C	D	E	데이터	SN비
인자	수	노즐의 직경	고압수의 압력	노즐과 석재표면의 이격거리	콘베이어 이동 속도	노즐 이동 속도		
수	1	30	0.1	0.1	0.5	0.1	50개중 불량품 수	$SN = 10 \log \left(\frac{1}{p} \right)$
준	2	50	0.2	0.2	1	0.2		
	3	100	0.3	0.3	1.5	0.3		
열#	실험#	1	2	3	4	5		
1	1	1	1	1	1	1	10	6.99
2	1	1	1	1	1	2	6	9.21
3	1	1	1	1	1	3	6	9.21
4	1	2	2	2	2	1	1	16.99
5	1	2	2	2	2	2	1	16.99
6	1	2	2	2	2	3	4	10.97
7	1	3	3	3	3	1	10	6.99
8	1	3	3	3	3	2	7	8.54
9	2	3	3	3	3	3	7	8.54
10	2	1	2	3	1	1	1	16.99
11	2	1	2	3	2	1	1	16.99
12	2	1	2	3	3	3	3	12.22
13	2	2	3	1	1	1	1	16.99
14	2	2	3	1	2	2	2	13.98
15	2	2	3	1	3	2	2	13.98
16	2	3	1	2	1	1	1	16.99
17	2	3	1	2	2	2	1	16.99
18	2	3	1	2	3	3	3	12.22
19	3	1	3	2	1	5	5	10
20	3	1	3	2	2	1	1	16.99
21	3	1	3	2	3	7	7	8.54
22	3	2	1	3	1	2	2	13.98
23	3	2	1	3	2	4	4	10.97
24	3	2	1	3	3	4	4	10.97
25	3	3	2	1	1	5	5	10
26	3	3	2	1	2	2	2	13.98
27	3	3	2	1	3	5	5	10

3.1.2 SN비의 분석

S/N비를 이용하여 분산분석한 결과는 <표 5>와 같다

<표 5> S/N비를 이용한 분산분석표

요인	SS	ϕ	V	F_0	$F(\alpha=0.05)$	$F(\alpha=0.01)$
A	110.45	2	55.23	11.43**	3.63	6.23
B	30.47	2	15.23	3.16		
C	27.50	2	13.75	2.85		
D	34.17	2	17.09	3.54		
E	45.60	2	22.8	4.72*		
e	77.27	16	4.83			
T	325.46	26				

<표 5>의 황등석에 대한 S/N비에 대한 분산분석 결과, A(노즐의 직경)인자는 $\alpha=0.05$ 와 $\alpha=0.01$ 에서 유의하므로 매우 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있다. B인자(고압수의 압력)와 C인자(노즐과 석재표면의 이격거리), D인자(컨베이어 이동속도)는 $\alpha=0.05$ 와 $\alpha=0.01$ 에서 유의하지는 않지만 $\alpha=0.1$ 에서 유의하므로 특성치에 약간의 영향을 미친다고 볼 수 있다. E인자(노즐 이송속도)는 $\alpha=0.05$ 에서 유의하므로 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있다. 유의한 인자들의 최적수준을 알아보기 위한 유의한 인자들의 1원표를 작성하면 <표 6>과 같다

<표 6> 각 인자들의 일원표

인자 수준	A	B	C	D	E
1	94.42	107.13	107.52	104.33	115.92
2	137.34	125.81	125.13	126.67	124.63
3	105.43	104.24	104.54	106.18	96.64

<표 6>을 보면 최적수준은 $A_2B_2C_2D_2E_2$ 임을 알 수 있다.

이 최적조건에서 S/N비에 대한 점추정치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A_2B_2C_2D_2E_2) &= \overline{A_2} + \overline{B_2} + \overline{C_2} + \overline{D_2} + \overline{E_2} - 4\overline{T} \\ &= 15.26 + 13.98 + 13.90 + 14.07 + 13.85 - (4 \times 12.49) \\ &= 21.1 \end{aligned}$$

4. 결 론

새로 개발된 석재표면가공장치를 효과적으로 활용하기 위해서 본 실험에서는 황등석(화강암)에 대한 석재본래의 천연색상과 질감을 유지하면서 균열이 없고 균질하고 까실까실한 석재표면으로 가공하기 위하여 최적가공조건을 다구찌 기법을 이용하여 분석하였다.

① 황등석에 대한 S/N비에 대한 분산분석 결과, A(노즐의 직경)인자는 매우 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있었다. 또한 E인자(노즐 이송속도)도 유의한 영향을 주는 인자임을 알 수 있었다. B인자(고압수의 압력)와 C인자(노즐과 석재 표면의 이격거리), D인자(컨베이어 이동속도)는 특성치에 어느정도 영향을 미친다고 볼 수 있다.

② 실험을 해본 결과, 노즐의 직경은 0.008인치, 고압수의 압력은 2100bar, 노즐과 석재 표면의 이격거리는 20mm, 컨베이어 이동속도는 1(m/분), 노즐 이송속도는 0.2(m/분)에서 황등석에 대한 표면 가공하는데 최적조건임을 알 수 있었다.

또한 새로 개발된 석재표면처리장치의 운영요소와 최적가공조건은 일치하므로 이를 표준화시켜 기존 버너작업보다 석재품질 및 작업생산성 향상과 인원 및 가공비를 절감하는 효과를 기대할 수 있게 되었다. 앞으로도 석재산업의 가공업종은 중국과 가격 경쟁에서 우위를 확보하려면 원가절감이 필요하며 이를 위해 제조공정에 대한 지속적인 기술개발이 요구된다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 대한광업진흥공사, “석재산업의 이해와 실태”, 1999.
- [2] 이동수, “석재응용의 이론과 실무”, 한불문화출판, 2000.
- [3] 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 표면거칠기의 최적조건 결정”, 공업경영학회지 제21권, 제46집, pp. 221-227, 1998.
- [4] 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 난연 ABS 사출공정의 최적조건 결정”, 안전경영과학회지, 제2권 제2호, pp. 167-176, 2000.
- [5] 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 β -carotene의 대량생산을 위한 최적환경 조건의 설계”, 안전경영과학회지, 제2권제3호, pp. 27-36, 2000.
- [6] 조용욱, 박명규, 김희남, “다구찌 방법을 이용한 폴리아세탈 수지 절삭조건 결정”, 안전경영과학회지 제3권제1호, pp. 117-125, 2001
- [7] 홍석목, 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 알루미늄 배선형 덕트의 유도노이즈(Noise)측정에 관한 연구”, 산업경영시스템학회지 제24권 제67집, pp. 61-67, 2001
- [8] 홍석목, 조용욱, 박명규, “다구찌 방법을 이용한 알루미늄 배선형 덕트의 스위칭 유

- 도노이즈 안정시간에 관한 연구”, 안전경영과학회지 제4권제2호, pp. 179-187, 2002
- [9] Husky S-200 Power Unit Operation & Service Manual, FLOW international corporation
- [10] Phadke Madhav S., Quality Engineering Using Robust Design, pp. 23-24, 1989.
- [11] Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 33-88, 1995.

저 자 소 개

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

조용욱 : 명지대학교 산업공학과를 졸업하고 동 대학원 산업공학과 석사 및 박사를 취득하였고, 또한 CPIM(미국 APICS 인증 조직자원관리전문가) 자격증을 취득하였으며, 현재 인덕대학 산업시스템경영과 교수로 재직중이다. 산업경영시스템학회 주최 제 5회 한백 학술상을 수상하였으며, 한국과학기술단체총연합회 주최 제 11회 과학기술우수논문상을 수상하였다. 주요 관심분야는 실험계획법, 품질공학, TQM, 6σ, ERP, TOC이론, SCM등이다.

박명규 : 한양대학교 산업공학과 졸업. 미국 일리노이 공대에서 산업공학 석사, 건국대학교 대학원 산업공학과에서 박사학위를 취득하였으며 현재 명지대학교 산업공학과 교수로 재직중이다. 주요 관심분야는 TQM, QE, METHODS ENG, 재고 물류관리, 확률모형, FORECASTING, 시스템분석등이다.