

페룰 무심연삭 가공의 표면거칠기 향상을 위한 최적인자 선정

이정현*, 백승엽*, 이은상⁺

(논문접수일 2006. 10. 17, 심사완료일 2007. 2. 2)

Selection of Optimum Conditions for Improving Surface Roughness of Ferrule in Centerless Grinding

Jung Hyun Lee*, Seung Yub Baek*, Eun Sang Lee⁺

Abstract

The surface roughness in centerless grinding is mainly affected by the many process parameters. For improving the surface roughness, the control of grinding parameters is very important. This paper deals with the analysis of the process parameters such as height of centers, tilting angle of the regulating wheel with respect to grinding wheel, rotation speed of regulating wheel, which are developed based on design of experiments such as factorial design. The investigation can enhance the surface roughness of ferrule. Finally, we have verified improved results of the optimized conditions.

Key Words : Centerless grinding(무심연삭), Design of experiments(실험계획법), Ferrule(페룰), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

현재 광통신 관련 부품이나 비구면 렌즈 등은 높은 가공정밀도가 요구되는 부품들이며, 이러한 제품들의 가공 정밀도를 만족시키기 위한 연삭 가공기는 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 최근에는 광통신 산업이 해가 거듭될수록 발전되고 있다. 이러한 광통신 산업 발전으로 인하여 광통신 부품 역시 수요 증대가 커지고 있다. 광통신을 위한 네트워크를 구축하기 위하여 필요한 기본적인 부품으로 광케

이블을 들 수 있다.

광케이블은 전반사를 이용하여 데이터를 전송을 하므로 먼 곳까지 데이터를 전송하기 위해서는 광커넥터를 이용하여 케이블을 연결시킨다. 그 중에 광커넥터의 핵심 부품인 페룰은 광케이블에 전송되는 데이터의 누락 및 손실이 발생하지 않게 광케이블을 연결시키려면 표면거칠기가 우수하여야 한다⁽¹⁾.

그렇기 때문에 광커넥터로 사용되는 페룰은 초정밀 연삭 가공이 필요하게 되는데 페룰은 크기가 매우 작으므로 보통

* 인하대학교 기계공학과 대학원
⁺ 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (leees@inha.ac.kr)
주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

외경 연삭기틀을 이용하여 가공을 하기에는 어려움이 따르고 높은 생산성을 도모하기 위하여 무심연삭 방법이 이용된다.

무심연삭 방법은 생산성이 높다는 장점을 가지고 있지만 기계의 조작이 어렵다는 단점 때문에 현장에서는 숙련자에 의해서만 가공이 행해지고 있다. 또한 가공인자 간의 영향이 커서 최적 가공을 위한 조건의 선정에 어려움이 따른다⁽²⁾.

이에 본 연구에서는 무심연삭 방법을 이용한 폐물 가공을 대상으로 실험계획법(Design of experiments, DOE)을 적용하여 무심연삭을 이용한 폐물 가공 시 표면거칠기를 줄이기 위한 조건을 구하는데 목적이 있다. 실험 계획법을 이용하는 목적은 어떤 요인이 반응에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하고 그 영향이 양적으로 어느 정도 큰가를 알아내기 위함이다. 따라서 무심연삭 메커니즘을 이해하여 폐물 연삭 시스템에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하고 도출된 인자는 효과적인 실험을 위하여 직교배열표(Orthogonal array)를 이용하여 각 인자들이 가공 결과에 영향을 미치는 정도를 분석하였으며, 실험 결과를 이용하여 분석을 실시하여 가공 최적조건을 결정하였다^(3,4).

2. 무심연삭 메커니즘 및 실험 계획법

2.1 무심연삭 메커니즘

무심연삭기(Centerless grinder)는 센터가 없이 공작물을 연삭하는 기계를 말하는 것이다. 즉, 보통 원형의 공작물을 연삭하는 원통연삭기 등에서는 주축 센터와 십압대 센터 사이에 공작물을 척킹하여 이 센터를 중심으로 도그(Dog)에 의하여 공작물을 회전시켜 연삭함에 반하여 무심연삭기는 연삭숫돌(Grinding wheel, G.W)로서 공작물을 회전시키고 이를 일정한 회전으로 유지하는 데에는 조정숫돌(Regulating wheel, R.W)을 사용하며 또 원통 연삭기의 센터 역할은 블

레이드(Blade)와 조정숫돌이 하게 된다. 또한 조정숫돌과 블레이드와의 경사 차이에 의해서 가공물이 전진하게 된다. 다만 원통 연삭기의 센터는 항상 일정한 높이가 유지되지만 무심연삭기에서는 연삭이 되면서 센터가 내려가는 것이 차이점이다. 무심연삭 방법은 가공물이 연삭숫돌을 통과하는 시간동안 가공을 수행하는 통과이송법(Through feed)과 숫돌 끝단에 가공물의 진행을 막는 고정막대(Stopper)를 설치하여 장시간 가공이 가능한 이송절입법(In feed)으로 크게 2가지로 나눌 수 있다. 무심연삭기의 연삭 단면도를 Fig. 1에 나타냈다. 여기서 α 는 블레이드 각, β 는 연삭숫돌에 대한 심고각, γ 는 조정숫돌에 대한 심고각을 나타낸다.

2.2 실험계획법

많은 변수들에 의하여 지배되는 복잡한 현상이 있을 때 각 변수가 전체적인 시스템에 미치는 현상을 알아보기 위하여 다양한 변수들의 조합을 통하여 실험을 수행한다. 또한 각 변수들의 조합은 실험으로부터 얻어지는 분석 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 신중하게 선택되어야만 한다. 실험 계획법은 통계적인 방법으로서 가공 공정의 혁신이나 불량률을 줄이는데 이용되고 있다.

실험계획법은 어떤 시스템에서는 현실적으로 제어가 가능한 제어변수(Control factor)와 제어가 어려운 잡음 변수(Noise factor)로 구분하여 최적 변수 조합을 찾는 방법이 제안되었고 이를 복잡한 통계이론을 통하여 잡음 변수의 영향을 차단코자 하는 방안으로 받아들여지고 있다. 또한 실험 계획법을 사용함으로써 얻을 수 있는 이점으로는 실험 횟수를 줄일 수 있다는 것에 있다. 본 논문에서 사용된 실험계획법은 2수준 요인배치법이다. 2수준 요인배치법은 각 가공인자들의 모든 조합의 실험이 가능하고 각 인자가 시스템에 영향을 미치는 주효과(Main effect)와 각 인자들 간의 교호작용(Interaction effect)을 분석하여 시스템에 대하여 파악이 용이하다⁽⁵⁾.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서는 지르코니아 세라믹 계열의 $\varnothing 2.5 \times 10\text{mm}$ 폐물을 가공하기 위하여 초정밀 무심연삭기를 이용하였다.

Fig. 2는 초정밀 폐물용 무심연삭기를 보여주고 있다. 폐물을 블레이드 위에 올려 연삭숫돌과 조정숫돌 사이로 보내어 숫돌을 한번 통과하면 가공이 끝나는 통과 이송 연삭 방법을 이용하였다. 조정숫돌과 연삭숫돌의 속도는 NC 킷트

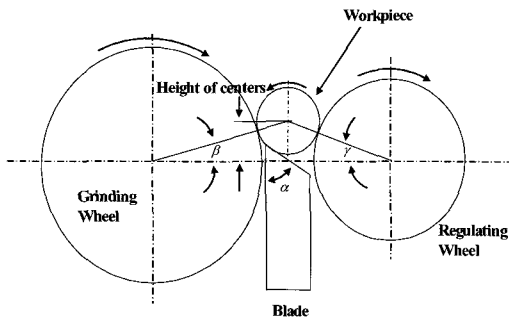
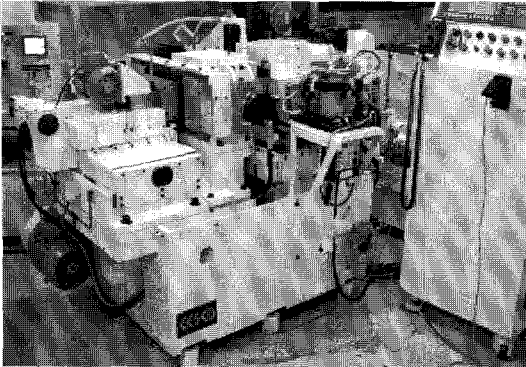
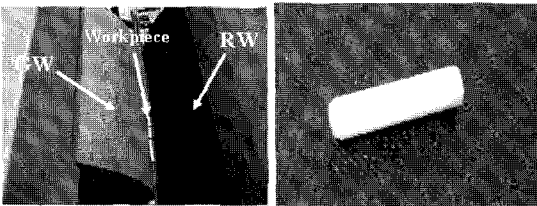


Fig. 1 Schematic diagram of centerless grinding



(a) layout of centerless grinding machine



(b) machining process (c) workpiece, ferrule

Fig. 2 Experimental centerless machine and workpiece

롤러를 이용하여 제어를 하였다. 연삭숫돌은 $\varnothing 255\text{mm}$ 이고 폭은 150mm 인 숫돌로 비트리파이드 본드 조성으로 이루어졌다. 조정숫돌은 $\varnothing 205\text{mm}$ 이고 폭은 180mm 이고 고무 본드 조성으로 이루어져 있다. 또한 무심연삭 방법에서는 가공물이 연삭숫돌에 들어갈 때와 나올 때에 가공물을 안정적으로 진행시키기 위하여 안내판(Guide plate)을 이용한다. 하지만 페룰의 경우에는 공작물의 크기가 워낙 소형이므로 안내판을 따로 설치할 수가 없다. 그렇기 때문에 조정숫돌의 폭을 연삭숫돌의 폭보다 크게 설정을 하여 조정숫돌이 안내판의 기능을 수행할 수 있도록 설계를 하였다.

연삭숫돌의 드레싱은 로터리(Rotary) 드레싱 숫돌을 이용하여 가공 실험을 시작하기 전에 절입량 $2\mu\text{m}$ 으로 드레싱을 해주었고 입자크기는 1000으로 중간 정도의 집중도를 가지는 다이아몬드 드레싱 숫돌을 이용하였다. 조정숫돌의 드레싱은 조정숫돌의 경사각을 바꿀 때마다 단인 공구 다이아몬드 드레싱을 이용하여 드레싱을 수행하였다. Table 1에 실험 장치의 자세한 사양과 Table 2에 드레싱 숫돌 및 조건에 대하여 나타내었다.

Table 1 Specification of grinding system

Unit		Specifications
Workpiece	Size	$\varnothing 2.5 \times 10\text{mm}$
	Material	ZrO ₂
Grinding wheel	Spec.	SD 1000 M 75 VD 1
	Size	$\varnothing 255 \times W150 \times \varnothing 152\text{mm}$
	Bond	Vitrified
Regulating wheel	Spec.	A 220 S R
	Size	$\varnothing 205 \times W180 \times \varnothing 127\text{mm}$
	Bond	Rubber

Table 2 Dressing condition

Unit		Specifications
G.W Dressing	Spec.	SD 100 Q 90 M W 6
	Size	$\varnothing 120 \times 20(T) \times 5(H)\text{mm}$
	Rotation speed	1050m/min(2787rpm) G.W : 1200m/min(1528rpm)
	Direction	Up Cut
	Depth of cut (10 pass)	0.02mm (0.002mm/pass)
	Traverse	65mm/min
R.W Dressing	Material	Single point diamond
	Depth of cut	0.010mm

3.2 가공인자 선정

무심연삭 시스템에서 공작물의 가공시간과 관련 있는 조정숫돌의 원주속도와 경사각이 중요한 파라미터로 작용하고 있으며 가공정밀도 향상을 위한 블레이드의 심고(Height of centers) 역시 중요한 파라미터로 작용을 한다. 보통 심고를 높이는 경우에는 공작물의 센터가 높아져서 공작물이 회전하기가 용이하고, 공작물의 센터가 높으면 높을수록 가공물이 진원에 가깝게 가공이 되므로 가공정밀도가 높아진다. 하지만 심고를 너무 높이면 공작물을 블레이드에 밀착시키는 힘이 감소하여 숫돌과 공작물의 접촉면적이 줄어들어 공작물이 안정되게 회전하지 못하고 진동 등의 발생으로 오히려 공작물의 정밀도가 악화되는 결과를 초래한다.

그렇기 때문에 가공인자의 적당한 범위의 선정을 통하여 안정된 상태에서 공작물을 회전시키면서 공작물의 정밀도를 높이는 것이 필요하다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

연삭숫돌의 속도는 1,800m/min으로 설정 하였고 습식 가공을 하였으며 조정숫돌의 원주속도는 60~100rpm까지 변화를 주었다. 표면거칠기 측정은 접촉식 표면거칠기 측정기 (Surfcom 480A)를 이용하여 측정 길이 4mm를 이동시켜 측정하였고 이때, 기준길이(Cut of length)는 0.8mm로 설정하였다. 또한 측정에 의한 오차를 줄이기 위하여 공작물을 두 번씩 측정하여 평균값을 특성치로 사용하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에 무심연삭 가공 방법을 가공한 페들의 표면거칠기를 나타내었다. Fig. 3은 조정숫돌의 경사각을 1°

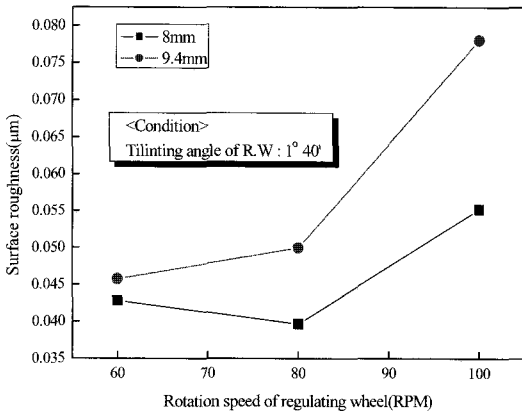


Fig. 3 Surface roughness vs regulating wheel rotation speed

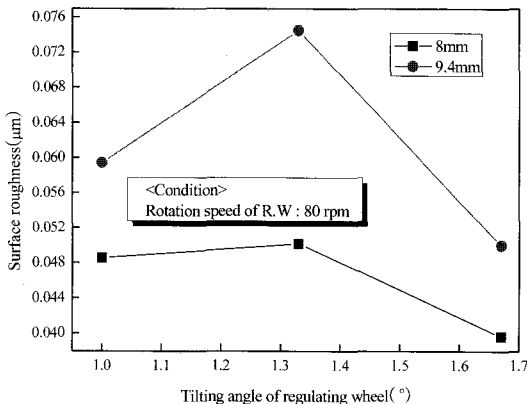


Fig. 4 Surface roughness vs regulating wheel tilting angle

40'로 고정을 시키고, 조정숫돌의 원주속도를 변화시키면서 얻은 표면거칠기를 나타낸 것이다. 심고가 9.4mm인 경우보다 8mm인 경우가 표면거칠기가 더 좋은 경향을 보여주고 있고, 전반적으로 조정숫돌의 원주속도가 60~80rpm 사이의 영역에서 좋은 경향을 보여주고 있다. 심고가 9.4mm의 경우에 가공 결과가 좋지 않은 이유는 심고가 높아지면 공작물의 센터가 높아지면서 공작물을 블레이드에 밀착시키는 힘이 줄어들어 안정적으로 가공이 이루어지지 않아, 그 결과로 인하여 페들의 표면거칠기가 좋지 않은 경향을 보인다.

Fig. 4는 조정숫돌의 원주속도를 80rpm으로 고정을 하여 조정숫돌의 경사각을 변화시키면서 얻은 표면거칠기를 나타낸 것이다. 심고는 Fig. 3과 같이 8mm인 경우가 더 좋은 결과를 보여주고 있고, 각 심고의 경우 모두 조정숫돌의 경사각이 1° 40'인 경우가 더 좋은 영향을 보여주고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 보면 각 가공인자의 변화에 따른 가공 결과인 표면거칠기에 대한 경향은 파악할 수는 있지만 각 인자가 가공 결과에 어느 정도 영향을 미치는 지는 정량적으로 파악이 불가능하다. 그렇기 때문에 실험계획법을 이용하여 적당한 범위 안에서 각 가공인자가 가공 결과에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

4.2 실험계획법을 이용한 실험 결과 분석

실험 결과를 보면 조정숫돌의 원주속도는 60~80rpm 사이에 가공 결과가 좋은 경향을 보이고 있다. 그래서 흥미 영역(Region of interest)을 Table 3과 같이 구분을 하여 각 가공인자에 따라 2수준으로 나누어서 선정하였다.

Table 4는 각 인자의 영향이 가공 결과에 영향을 미치는 기여도를 파악하기 위하여 $L_8(2^3)$ 직교배열표를 보여주고 있다. 실제 실험에는 신뢰성이 높은 가공 결과 분석을 얻기 위하여 반복수를 10번으로 설정을 하여 실험을 하였다. 그래서 실제 실험은 수행한 실험 수는 80번이며, 이 실험 결과를 가지고 분석을 실시하였다.

Table 5에 각 가공조건에 따른 특성치인 페들의 중심선

Table 3 Design scheme of process parameters and their levels

Factor	Level	Low(1)	High(2)
	Height of centers(mm)		8
R.W tilting angle(°)		1	1.67
R.W rotation speed(rpm)		60	80

표면거칠기의 평균값을 나타내었다. Table 5에 나타난 각 인자에 따른 가공 결과를 통하여 통계프로그램인 미니탭(MINITAB)을 이용하여 평균값을 도출하고 최적 수준을 결정하였다.

Fig. 5는 각 가공인자의 주효과에 대한 해석을 나타낸 것이다. 각 인자의 평균치를 나타낸 그래프로서 인자의 수준을 변경했을 때 기울기가 작은 그래프보다 수준이 변화하였을 때 각 인자의 기울기가 큰 인자가 다른 인자에 비해 많은 영향을 미친다고 판단이 되는 것이다.

그 결과 심고와 경사각이 주요한 인자라고 판단이 되고 조정숫들의 원주속도는 다른 인자에 비해 결과에 미치는 영향이 적다고 판단이 된다. 또한 각 인자의 평균이 작을수록 반응량인 표면거칠기 값 또한 작다는 것을 의미하므로 심고는 8mm에서 조정숫들의 경사각은 1° 40', 조정숫들의 원주속도는 80rpm에서 더 좋은 결과 값을 얻었다고 할 수가 있다.

Fig. 6은 각각의 인자에 대한 상호 작용을 나타낸 것이다.

Table 4 $L_8(2^3)$ orthogonal array

Trial No.	Height of centers(mm)	R.W tilting angle(°)	R.W rotation speed(rpm)
1	8.0	1.0	80
2	8.0	1.67	60
3	8.0	1.0	60
4	8.0	1.67	80
5	9.4	1.0	60
6	9.4	1.67	80
7	9.4	1.0	80
8	9.4	1.67	60

Table 5 Experimental results in each machining condition

Trial No.	Average surface roughness(μm)
1	0.048
2	0.042
3	0.046
4	0.080
5	0.049
6	0.059
7	0.045
8	0.039

하지만 Fig. 6으로는 각 인자의 교호 작용을 파악할 수는 있지만 크기를 상대적으로 비교하기엔 어려움이 있고, 교호 작용이 유의한지를 파악하기가 어렵다. 그렇기 때문에 Fig. 7과 같은 파레토(Pareto) 차트는 각 교호작용의 영향 크기의 비교와 주효과와의 비교가 가능하다. 파레토 차트는 분석자가 한 눈에 효과 크기의 중요도를 확인할 수 있게 해준다.

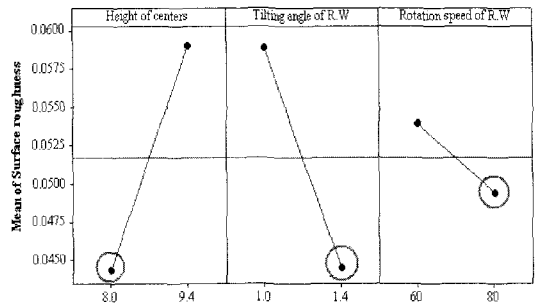


Fig. 5 Main effect of surface roughness

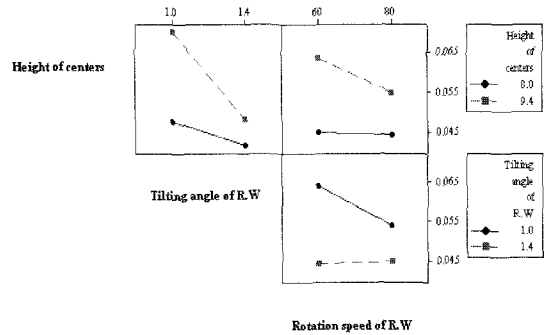


Fig. 6 Interaction effect of surface roughness

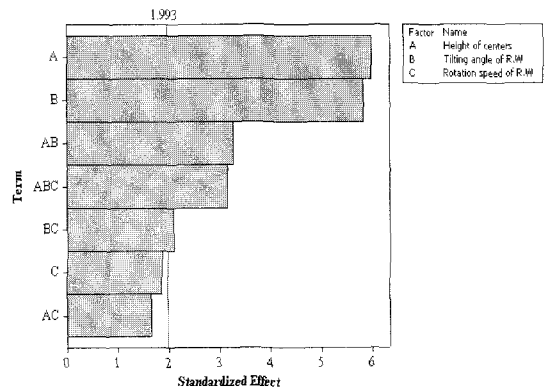


Fig. 7 Pareto chart of the standardized effects

Table 6 ANOVA table for surface roughness

Source	D.F	Adj S.S	Adj M.S	F-value	F(0.01)
Main effect	3	0.008795	0.0029316	24.54**	4.06
2-Factor interactions	3	0.002139	0.0007131	5.97**	4.06
3-Factor interactions	1	0.001197	0.0011974	10.02**	7.00
Error	72	0.008601	0.0001195		
Total	79	0.020732			

그리고 파레토 차트는 효과의 절대적인 값을 표시하고 차트에 참조선에 그린다. 이 참조선을 지나 뺀어 있는 효과는 잠재적으로 중요하다고 판단이 된다. 여기서 참조선은 유의 수준 0.05에 해당되는 참조선이며 1.993을 지나는 직선으로 그것을 지나는 인자인 A(심고), B(조정숫들의 경사각), A×B, A×B×C, B×C는 유의하다고 생각되어지는 인자이고 그와 반대로 C(조정숫들의 원주속도), A×C는 유의하지 않는다고 판단된다.

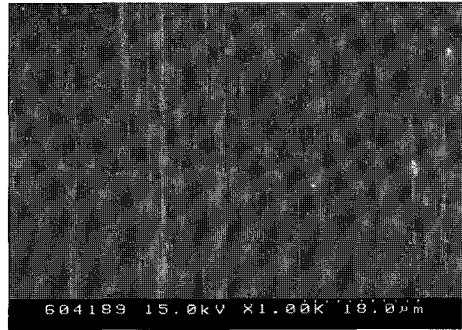
막대의 길이에서도 알 수 있듯이 주효과의 경우에는 심고와 조정숫들의 경사각이 가장 큰 영향을 미친다는 것을 재확인할 수가 있었다. 또한 교호 작용의 영향은 주 효과의 영향보다는 크지 않다는 것을 알 수가 있다.

각 인자에 따른 정량적인 분석을 위해서 Table 6에 분산분석표(ANOVA, analysis of variance)를 나타내었다. F 검정값이 클수록 그 인자가 유의하다는 것을 의미하는데 주효과와 교호작용 모두 99% 수준 안에서 유의하다는 것을 보여주고 있다. 그리고 주효과 영향이 교호작용에 비해 크다는 것을 분산분석표를 통해 다시 확인할 수가 있었다. 분산분석표는 각 인자의 영향도의 크기만의 비교 가능한 파레토 차트와는 달리 정량적으로 표현이 가능하다는 장점이 있다.

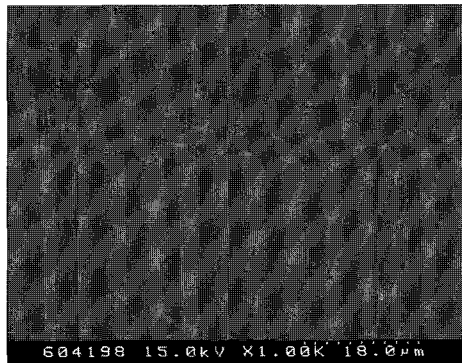
4.3 최적인자 검증

주효과 분석을 통한 평균치가 가장 작은 인자들의 조합인 8mm에서 조정숫들의 경사각은 1° 40', 조정숫들의 원주속도는 80rpm에서 가장 작은 표면거칠기를 나타낸다. 그 이유는 교호작용 분석에서 각 인자들 간의 교호 작용이 없는 것으로 보이므로 교호작용이 없는 경우에는 주 효과만의 조합으로도 가장 좋은 결과를 얻을 수 있는 조건을 찾을 수가 있기 때문으로 생각된다.

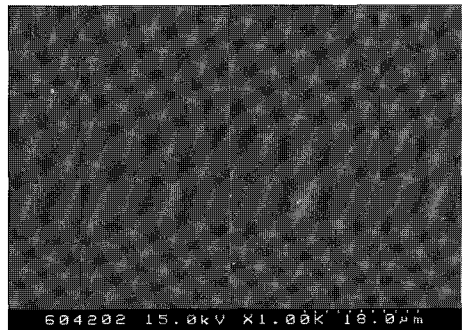
Fig. 8은 주사 전자 현미경(SEM)을 이용하여 가공하기 전의 페룰(Ra: 0.3 μ m)과 최적조건인 심고 8mm, 조정숫들의



(a) before machining



(b) after machining



(c) after machining in optimum condition

Fig. 8 SEM photograph with surface of ferrule

경사각 1° 40', 조정숫들의 원주속도 80rpm에서 가공을 한 페룰의 표면(Ra: 0.039 μ m) 그리고 최적조건 이외의 조건에서 가공 한 후의 페룰(0.059 μ m)을 100배로 확대하여 찍은 사진이다. 가공하기 전에는 세라믹 계열의 페룰의 표면이 매끄럽지 않다는 것을 확인할 수가 있는데 가공 한 후의 페룰의 표면을 살펴보면 가공 전의 페룰보다 향상된 면을 보여주

고 있다. 하지만 Fig. 8 (b)를 보면 가공 전의 페룰 표면보단 덜 하지만 아직 연삭 흔적이 깊게 남아 있다는 것을 확인할 수가 있다. 하지만 최적조건 하에서 가능한 페룰의 표면의 경우에는 연삭 흔적이 많이 없어서 최적조건으로 가공한 페룰의 표면이 기존에 비해 향상된 것을 확인할 수가 있었다.

5. 결론

본 연구는 광커넥터용 페룰의 초정밀 연삭 가공을 위하여 무심연삭 가공 방법에 대한 실험과 실험계획법을 통하여 페룰의 표면거칠기 향상에 대하여 연구하였다. 가공인자 중에 주요 인자를 도출하고 표면거칠기에 대한 최적조건을 표준화한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 조정숫돌의 원주속도를 60~100rpm으로 증가시켜 가면서 페룰의 무심연삭 가공 결과, 조정숫돌의 원주속도가 작은 60~80rpm 영역에서 페룰의 표면거칠기가 더 좋아진다는 것을 알 수 있었다. 또한 심고의 높이는 9.4mm보다 작은 경우인 8.0mm 경우가 표면거칠기가 더 좋은 결과를 나타내었다.
- (2) 각 인자들의 주효과 분석을 통하여 페룰 가공용 무심연삭기의 가공인자 중에 표면거칠기를 결정할 때 심고가 가장 큰 영향을 주고 그 다음으로 조정숫돌의 경사각, 조정숫돌의 원주속도 순으로 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 각 제어 인자의 최적조건은 심고는 1수준(8mm), 조정숫돌의 경사각은 2수준($1^{\circ} 40'$), 조정숫돌의 원주속도는 2수준(80rpm)이다.
- (3) 무심연삭을 이용한 페룰 가공 시 가공 특성치인 표면거칠기를 결정하는데 각 인자들의 교호작용은 주효과에 비해 적은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 실험계획법을 통하여 예측한 최적조건으로 실제 실험에 반영하여 연삭 가공을 수행한 결과, 표면거칠기가 다른

가공조건에 결과보다 향상된 $0.030\mu\text{m}$ 로 나타났다. 실험 계획법을 이용한 선정된 최적 가공인자가 실제로도 잘 적용될 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

- (1) Lee, E. S., Chun, Y. J. and Kim, N. K., 2005, "A study on the Optimum Condition Selection of Rotary Dressing System of Ultra-Precision Centerless Grinding Machine for Ferrule," *Key Engineering Materials*, Vol. 291-292, pp. 189~184.
- (2) Dhavlikar, M. N., Kulkarni, M. S. and Mariappan, V., 2003, "Combined Taguchi and Dual Response Method for Optimization of a Centerless Grinding Operation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, pp. 90~94.
- (3) Chung, W. J., Cho, Y. D., Lee, C. M., Jung, D. W. and Song, T. J., 2006, "A Study on the Reduction of Unclamping Time by Design of Experiments," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No.3, pp. 1~7.
- (4) Baek, S. Y. and Lee, E. S., 2006, "Evaluation on the Optimum Grinding of Aspheric Surface Micro Lens for Camera Phone," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 1~9.
- (5) Santos, K. S. C. R., Silva, H. S. R. C., Ferreira, E. I. and Bruns, R. E., 2005, "32 Factorial Design and Response Surface Analysis Optimization of N-carboxybutylchitosan Synthesis," *Carbohydrate Polymers*, Vol. 59, pp. 37~42.