

다구찌 방법론에 근거한 초정밀 센터리스 연삭의 최적 드레싱 가공 조건 선정

천영재*, 이정현(인하대 대학원 기계공학과), 이은상(인하대 기계공학과)

Selecting Optimal Dressing Parameters of Ultra-precision Centerless Grinding Based on the Taguchi Methodology

Y. J. Chun, J. H. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.), E. S. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.)

ABSTRACT

In this study, rotary type diamond dressing system for ultra-precision centerless grinding for ferrule was developed at the first time and experiments were conducted with AE sensor and hall sensor system to verify the optimum dressing condition for ultra-precision centerless grinding for ferrule. The correlations with the condition of dressing are evaluated by AE signal analysis with root mean square (RMS) and frequency analysis. And current signals from hall sensor are also studied as a factor of dressing optimum condition selection. Dressing process was conducted to investigate the effects of depth of cut, rotating speed, and the number of overlap to select the optimum condition of rotary dressing system of ultra-precision centerless grinding machine for ferrule fabrication. In order to verify the optimum condition of dressing, AE and current signals were compared with the surface quality of dressing wheel and grinding wheel for ultra-precision ferrule grinding. All of these experiments were completed by Taguchi Methodology to reduce experimental time. Hence, the optimum condition of rotary dressing system for ultra-precision centerless grinding for ferrule fabrication can be selected following to the experiment result from signals of AE and hall sensor.

Key Words : Rotary dressing system(로터리 드레싱 시스템), Centerless grinding (무심연삭기), Ferrule (페룰), Taguchi Methodology(다구찌 방법론)

1. 서론

지르코니아 세라믹 재료는 페룰(Ferrule)을 비롯하여 자동차, 항공우주 부품에 이르기까지 그 응용 범위가 광범위하며 현재 성장추세에 있다. 이러한 취성 재료는 원하는 형상과 표면정밀도를 얻기 위해 초정밀 다이아몬드 무심연삭(centerless) 가공법을 사용한다.

연삭 공정은 연삭 입자의 날 무덤이나 연삭 슷들의 눈메움 현상을 방지하기 위한 드레싱 공정이 필요하게 된다. 특히 페룰과 같은 정밀을 요하는 부품의 경우에는 연삭 슷들의 성형성 증대와 고정도의 가공을 위해서 드레싱 공정이 필수 불가결하다. 드레싱 공정에는 여러 가지 방법이 있지만 현

재 국내에서 적용되고 있는 무심 연삭기의 드레싱 방법은 수작업을 통한 것으로서 드레싱 시 소요되는 시간이 많이 걸리게 되고 작업 효율도 떨어져 슷들의 드레싱 결과가 좋지 않다.^{(1),(2)}

따라서 드레싱 공정 자동화를 실현하면서, 최적의 드레싱 상태를 검증하기 위한 방법들이 제안되고 있으며, 본 연구에서는 AE 센서 및 Hall 센서를 동시에 이용하는 방법을 채택하였다. 이는 불규칙 입자 마찰인 드레싱 슷들과 연삭 슷들의 움직임을 AE 센서 신호로서 분석하고, 절입깊이 및 드레싱 속도에 따른 모터부 부하를 Hall 센서로 측정하여 동시에 신호 분석을 한다. 그리고 이렇게 얻어진 원신호를 주파수 분석 및 RMS 분석을 통하여 페룰용 무심 연삭기의 최적 드레싱 상태를 검증한다.

본 실험은 다구찌 방법론(Taguchi Methodology)을 적용하여 실험의 수행시간과 비용을 최소화 시키고, 직교 배열표를 사용한 효율적인 실험계획을 사용함으로써 기존의 실험횟수보다 월등히 적은 실험을 가지고서 드레싱 최적 조건을 도출해낼 수 있도록 하였다.⁽³⁾

2. 다구찌 방법에 의한 실험계획 수립

실험 계획법에서 실험 후 얻어지는 데이터를 특성치(characteristic value)라 하고, 이 특성치에 영향을 주는 원인중에서 실험에 취급된 원인을 인자(factor), 실험을 하기 위한 인자의 실험조건을 인자의 수준(level)이라고 한다.

제품의 품질을 향상시키거나 불량율을 감소시키려는 실험에서 일반적으로 고려해야 할 인자의 수는 많다. 이렇게 인자의 수가 많은 경우 특성치에 영향을 미치는 주효과와 기술적으로 보아서 영향을 미칠 것 같은 2 인자 교호작용(interaction)을 검출하고, 영향을 미치지 않을 것으로 생각되는 2 인자 및 고차의 상호 작용을 희생시켜 실험 횟수를 적게 하면서 특성치에 영향을 미치는 인자의 특성을 파악할 수 있도록 한 것이 직교 배열표이다.

그러나 인자의수가 많은 경우 상호 작용은 무시하고 인자들만을 배치하여 실험을 할 수 있도록 계획된 것이 확대 직교 배열표이다. 이것은 일반적으로 표준형보다 열(column)의 수가 많으며, 두 열의 상호 작용이 어느 특정한 열에 없고 다른 열에 산재해 있기 때문에 상호작용은 배치할 수 없다.^{(3),(4)}

본 연구는 실험 계획법의 직교 배열표에 의하여 실시되었으며 4 수준 3 인자의 조건이며 Table 1 에서 나타난 바와 같이 냉각액(coolant) 유무와 드레싱숫돌 속도(dresser speed), 그리고 절입 깊이(depth of cut)가 3 인자가 되며, 각각의 인자의 조건들에 대해 AE, hall 센서를 적용하여 신호 특성 분석을 수행하여 결과를 고찰하였다. 따라서 S/N 비를 이용한 실험결과와 분산분석표는 생략되고 획득된 센서 신호의 분석을 주요 결과 고찰의 토대로 한다. 또한 냉각액의 유무, 드레싱숫돌의 회전속도, 절입 깊이에 따른 교호작용은 없다고 가정하여 실험을 수행하였으며, 이는 기존의 무심연삭 드레싱 가공 데이터를 바탕으로 설정하였다.

Table 1 Experimental conditions

Sign	Factors	unit	Level			
			0	1	2	3
A	Coolant		Exist	Non-Exist		
B	Dresser speed	rpm	600	1000	1300	1700
C	Depth of cut	μm	0.5	1.0	1.5	2.0

Table 2 Tables of orthogonal arrays (L₁₆(4³))

Experiment No.	Factors		
	A	B	C
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	2	2
4	0	3	3
5	0	0	1
6	0	1	0
7	0	2	3
8	0	3	2
9	1	0	2
10	1	1	3
11	1	2	1
12	1	3	0
13	1	0	3
14	1	1	2
15	1	2	1
16	1	3	0

L₁₆(4³)의 직교 배열표를 사용하여 Table 2 에서 나타난 바와 같이 16 회의 실험을 수행하였고, 드레싱 공정 중에 변화하는 신호들을 분석하였다.

드레싱 공정 중 AE 및 Hall 센서 신호 변화 및 안정성 여부에 가장 큰 영향을 끼칠 것으로 예상되는 것은 인자 B 와 C 로 예상되며, 기술적 및 경험적으로 보아 냉각액의 유무는 그리 큰 영향인자로 작용하지 않을 것으로 예상된다. 수준(Level)의 선정은 기존의 무심 연삭 가공용 드레싱 조건을 중심으로 선정하였으며, 본 연구에 사용된 페롤가공용 초정밀 무심연삭기 장치는 마이크로 단위의 고정밀도를 요구하는 장비이므로 보다 세밀한 분석을 위하여 절입 깊이는 0.5μm의 단위로 0.5 ~ 2.0 μm 까지 변화를 주었고, 드레싱숫돌의 회전 속도는 600에서 1700rpm 까지 변화를 시켜서 센서 신호를 획득하였다. 드레싱숫돌의 회전속도는 30Hz 부터 97.5Hz 까지 변화를 주었으며, 컨버터를 통하여 rpm 수치로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그리고 드레싱 좌우이송 속도는 2.5 mm/sec 로 고정하였다.

AE 및 Hall 센서 신호로부터 획득된 원신호와 RMS 값의 분석은 본 연구의 연삭 숫돌의 표면 특성 비교와 더불어 향후 가공된 페롤의 표면 거칠기 및 원통도의 측정과 함께 비교 분석되어 최적의 조건을 선정하는 데 기초가 될 수 있을 것이다.

3. 실험 방법 및 장치

3.1 실험 장치의 구성

Fig.1 은 드레싱 최적 조건 선정 실험을 위한 장치의 구성을 보여준다. 실제 드레싱 시에 발생하는 AE 신호를 획득하기 위해서 드레싱 슯돌 하우징(실제 드레싱이 되는 부분과 가장 가까운 부분)에 AE 센서를 부착하였고, AE 센서는 잡음에 강인한 차동형으로 응답주파수 특성이 넓은 주파수 범위에서도 균일한 감도를 나타내는 광대역 센서를 사용하였다. 프리 앰프(1220A(PAC))와 메인 앰프(AE1A(PAC))를 사용하여 신호를 증폭하였으며, 12 비트의 분해능을 갖는 A/D 변환기를 사용하여 AE 센서에서 얻어진 전기적 신호를 디지털화하여 컴퓨터에 저장하고 드레싱 상태를 AE 신호와 함께 분석하였다.⁽⁵⁾

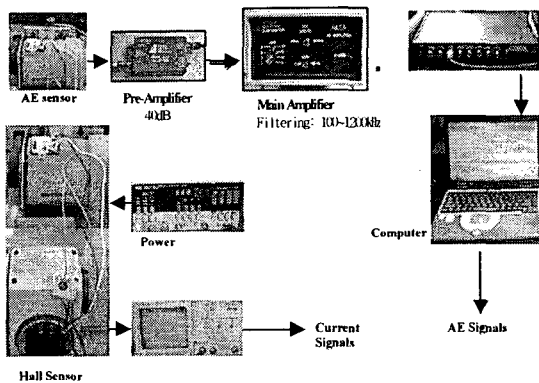


Fig. 1 experimental set-up (the AE and Hall sensors)

뿐만 아니라, 실제 드레싱 시에 연삭스톨과 드레싱스톨 사이의 부하를 전류신호로 획득하기 위하여 Hall 센서를 드레싱 모터부 전원부에 연결하였다.

안정된 드레싱 조건에서 획득된 AE 및 Hall 센서 신호는 연속형 균일 파형을 가지고 있으며, 불안정한 가공 조건이거나 과도한 부하의 발생시에 진동 등으로 인한 신호는 돌발형 파형을 가지게 된다. 이는 획득된 신호를 주파수(FFT) 및 RMS 변환을 함으로써 보다 변밀하게 분석할 수 있다.

3.2 드레싱 모터 부하와 전류신호

본 실험에서 사용된 드레싱 장치는 설계된 드레싱 주축의 원활한 구동을 위해서 적용된 모터의 출력 및 외형 치수는 다음과 같다.

- 1) 출력 : 0.4 Kw, 4P
- 2) 사양 : 220 V, 60Hz

드레싱 모터부의 부하에 따른 전류신호의 변화를 획득하기 위한 Hall 센서는 전자기 유도 (electromagnetic induction effect)에 의하여 전류신호로 바꾸어주며, 본 실험에서 사용된 Hall 센서의 응답 속도는 10 μ s 이고, DC 12V의 파워를 사용하며, 2 V를 3.75A로 바꾸어 주는 타입이다.

3.3 드레싱과 AE 신호

드레싱스톨과 연삭 슯돌이 드레싱 공정을 수행할 때는 슯돌간의 요철이 과도하게 탄성 접촉하면서 회전한다. 이러한 공정에 대하여 AE 센서를 적용하여 가시적으로 검출된 탄성파를 획득하고 주파수 분석 및 RMS 분석을 수행하여 드레싱 공정상태를 감시하고, 최종 연삭 제품의 품질을 비교하여 최적의 드레싱 상태를 도출해낸다.

AE 센서에 의해 검출된 신호는 대부분 미약한 신호이기 때문에 전기적인 라인을 통해 전달되면서 감쇠현상(Attenuation)이 나타나고, 신호 처리를 위해서 Gain 값 조절이 가능한 프리 앰프와 메인 앰프를 이용하여 증폭한다.⁽⁶⁾

본 실험에서는 이렇게 획득된 AE 신호를 주파수 분석과 RMS 분석을 하여 비교하였다. 마멸이나 마찰에 의해 발생하는 신호는 대체로 연속형의 AE 신호이며, 이러한 신호에 대해서는 실효치 전압(Root Mean Square)을 사용하여 분석한다. 실효치 전압은 시간 축(t)에 대하여 얻어진 AE 파형을 $V(t)$ 라고 하면 다음 식(1.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$RMS = [(1/\Delta T) \int_0^{\Delta T} V^2(t)dt]^{1/2} \quad (1.1)$$

3.4 드레싱스톨과 연삭스톨

Table 1 은 본 연구에서 사용된 센터리스 연삭기의 연삭 슯돌과 드레싱스톨의 사양을 나타낸다. 페룰의 초정밀 무심연삭을 위한 연삭 슯돌은 입자크리 10000 을 텅스텐 결합제로 결합한 M Grade 의 200mm 광폭 슯돌이며, 드레싱 슯돌은 역시 다이아몬드를 입자로 하는 형태의 원형 로터리 타입이다.

Table 1 Specification of Grinding and Dressing wheel

	Abr. Type	Grain Size	Grade	Stru.	Bond Type
Grinding Wheel	SD	1000	M	75	WB
Dressing Wheel	SD	20~25	Q	50~80	W

4. 실험결과 및 분석

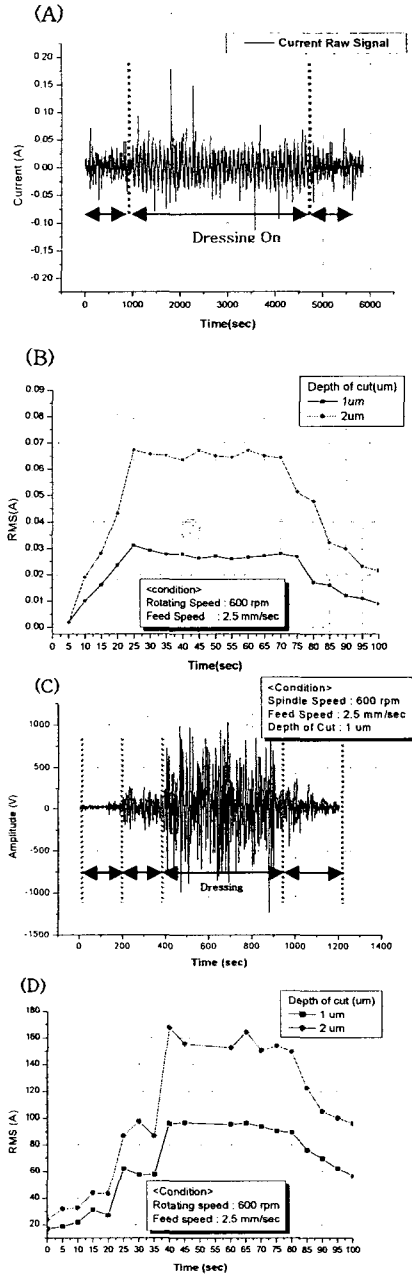


Fig.2 The relationship between the AE and Hall sensor signals and depth of cut

Fig.2 는 드레싱 절입깊이(depth of cut)의 변화에 따른 AE 센서와 Hall 센서의 원신호(raw signal) 패턴과 RMS 값 비교분석에 관한 것이다. (A)와 (B)는 Hall 센서로부터 획득된 전류신호이고, (C)와 (D)는 AE 센서로부터 획득된 AE 신호이다.

(A)에서는 드레싱 공정 수행전과 수행중의 전류 신호 변화를 보여준다. AE 원신호인 (C)에 비하여 그 진폭변화는 적으며 드레싱 부하는 안정적인 패턴을 보여준다. 반면, (C)에 나타난 AE 원신호는 두 번의 앰프(Amplifier)를 거치면서 신호가 증폭되어 드레싱 공정 수행전과 수행중의 신호가 확실하게 구별되며, 그 변화양상 또한 크다.

(B)는 절입 깊이에 따른 RMS 비교 그래프이며, 1 μ m 일때의 전류신호 RMS 가 2 μ m 일 때에 비하여 약 2.0 배, (D)의 AE RMS 비교에서는 약 1.3 ~ 1.6 배의 차이를 보임을 알 수 있으며, 따라서 절입 깊이에 따른 최적의 드레싱 조건을 찾기 위해서는 안정적이고 균일한 RMS 특성을 보여주는 Hall 센서로부터 획득된 전류신호 분석이 타당하다.

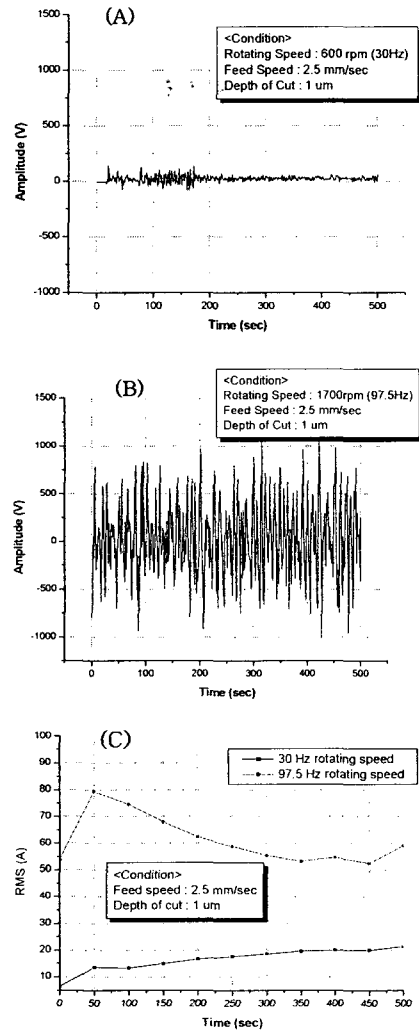


Fig.3 The relationship between the AE signals and dresser speed

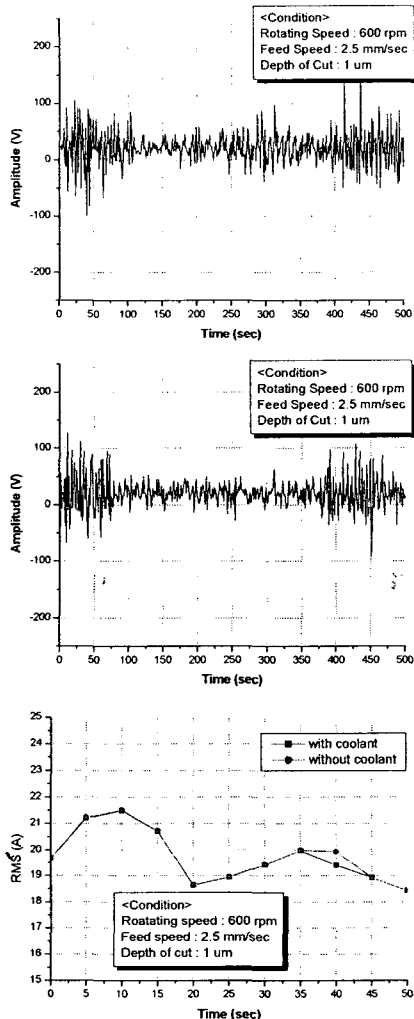
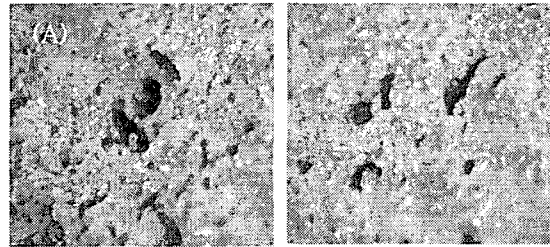


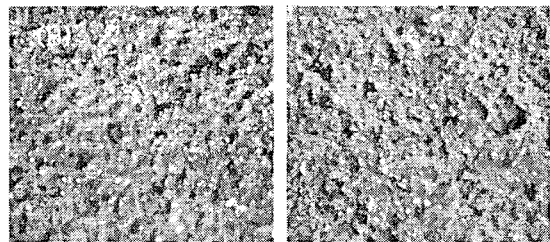
Fig.4 The relationship between the AE signals and coolant

드레싱 속도변화에 따른 AE 신호는 Fig.3 에 나타나 있다. 600rpm (30Hz) 에서의 원신호와 1700rpm (97.5Hz) 에서의 원신호는 시간에 따른 진폭 (Amplitude)의 변화가 거의 유사하다. 이러한 원신호는 RMS 값으로 변환하여 비교해보면 보다 면밀하게 알 수 있는데, Fig.4 의 세 번째 그래프가 냉각유가 있을 때와 없을 때의 RMS 값을 비교하여 보여준다.

AE 신호평가에 있어서 냉각유가 신호의 파형에 미치는 영향을 검토해야만 가공상태를 명확하게 규명지을 수 있다. 본 연구에서 얻어진 결과에서 알 수 있듯이, 냉각유가 AE 신호의 분석에 미치는 영향은 아주 미비하다. 따라서 무심연삭 장치의 드레싱 공정시 획득된 AE 신호는 드레싱공정에 관련된 신호들만 획득되었다고 볼 수 있으므로 최적 조건 선정의 주요인자에서 제외시킬 수 있다.



(A) Surface of grinding wheel before dressing process



(B) Surface of grinding wheel after dressing process

Fig.5 Surface characteristics of grinding wheel before dressing and after dressing

Fig.5 는 드레싱 전과 드레싱 후의 연삭 슯돌 표면상태를 비교하여 나타낸 사진이다. 동일지점에 대하여 반복 측정하였으며, 표면 균일도의 변화 및 다이아몬드 연삭 입자의 돌출 현황을 비교하였다.

(A)에서는 수천 회의 페룰 가공을 한 뒤의 연삭 슯돌의 표면 모습이며, 불균일한 표면과 불규칙적인 기공의 존재, 그리고 다이아몬드 입자의 불균일한 배열을 볼 수 있다.

반면, (B)는 본 연구에서 얻어진 최적의 조건을 바탕으로 드레싱을 하여 나타나게 된 연삭 슯돌의 표면 모습이며, 균일하고 고른 분포를 나타내는 다이아몬드 입자, 그리고 평탄한 연삭 슯돌의 표면을 관찰할 수 있다. 이러한 광학 현미경에 기초한 연삭 슯돌의 표면 비교 분석은 페룰 가공후의 최종 품질과 더불어 최적의 드레싱 조건을 선정하는 평가의 근거로 사용된다.

본 연구에서 획득된 AE 및 Hall 센서 신호를 바탕으로 한 최적 조건은 냉각유의 유무와는 상관없이 드레싱 슯돌 회전 속도 30Hz (600rpm), 절입 깊이 1.0μm, 그리고 좌우이송속도 2.5μm 이며, 이러한 최적 조건은 다구찌 방법론에 근거하여 최소한의 실험을 통하여 선정되었다.^{(7),(8)}

이와 같은 연구의 결과는 페룰 가공의 최종 품질과 밀접하게 관련되고, 이에 따라 최고 주요한 드레싱 인자의 선정에 영향을 미치게 된다. 드레싱 슯돌 속도변화와 관련하여 Hall 센서를 적용하여 전류값 분석을 수행하고, 드레싱 절입 깊이에 따른

드레싱 최적 가공 조건 선정과 관련하여 AE 센서를 적용하여 원신호, RMS 분석을 수행하여 데이터를 획득하면, 패물 가공용 무심 연삭기의 최적 조건은 연삭 슷들의 광학적 비교, 최종 패물 가공품의 품질 평가와 더불어 우수한 평가 방법임을 알 수 있다.

5. 결론

패물 가공용 초정밀 무심연삭기의 다이아몬드 로터리 드레싱 공정의 최적 조건 선정을 위하여 본 연구에서는 AE 및 Hall 센서를 적용하였고, 실험의 효율성을 높이기 위하여 교호작용을 무시한 다구찌 방법론을 기초로 하여 실험 계획을 구상하였다.

또한 센서의 원신호 비교와 더불어 RMS 값으로 변환하여 비교 분석하였고, 드레싱 슷들 회전 속도, 드레싱 절입깊이 및 냉각유의 유무를 주요 가공변수로 하고, 드레싱 좌우이송 속도는 $2.5\mu\text{m}$ 로 고정하여 실험하였다.

센서로부터 획득된 신호의 평가와 드레싱 전후 연삭 슷들의 표면 상태 비교를 통해 최적의 가공조건을 도출하였다.

- (1) AE 센서 신호를 바탕으로 한 최적 조건은 냉각유의 유무와는 상관없이 드레싱 슷들 회전 속도 30Hz (600rpm) 근처에서 가장 안정적인 경향을 보였다. 드레싱 슷들 회전수를 97.5Hz(1700rpm)까지 올리면서 AE 신호를 측정해본 결과 불안정하고 원신호에서 진폭(Amplitude)의 변화가 불규칙적이었다. 이는 다이아몬드 드레싱 슷들과 다이아몬드 연삭 슷들이 탄성 마찰 거동을 하면서 불균일하게 형성된 다이아몬드 입자들의 과다 마찰 작용에 근거한 것으로 판단할 수 있다.
- (2) Hall 센서를 바탕으로 한 절입깊이에 따른 드레싱 최적 가공 조건 분석은 AE 센서에 비하여 안정적인 신호형태를 보여줌으로써 채택되었고, 그 결과 $1.0\mu\text{m}$ 의 수준에서 표면이 가장 균일하고 고르게 분포된 다이아몬드 입자를 뚫출시키는 연삭 슷들의 결과를 보여주었다.
- (3) 드레싱 공정에 있어서 좌우 이송 속도는 2.5mm/sec 로 고정하여 사용하였으며, 이와 더불어 냉각유의 유무를 고찰한 결과 센서 신호에 거의 영향을 주지 않으므로 최적 조건 선정에 관한 주요 변수에서 제외하여 실험을 수행할 수 있었다. 따라서 무심연삭 최적 드레싱 조건 선정에 있어서 AE 센서 및 Hall 센서의 적용 및 비교 평가는

매우 타당하며, 다구찌 방법론에 근거하여 효율적인 실험을 수행하였으므로 신뢰할 수 있는 최적 가공 조건이라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 중기거점사업인 “고기능성 부품 가공용 지능형 연삭 시스템”의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Bong-Jin Bark, Eun-Sang Lee, Hun-Jong Choi, Seok-Woo Lee, Soon-Joo Cho, “A study of Rotary Diamond Dressing System of Centerless Grinder for Ferrule Grinding,” Korean Society of Precision Engineers,” pp.28-31, 2002.
2. Eung-Sook Lee, Sung-Kuk Lee, Kyung-Huyn Whang, Myeong-Young Jung, Tae-gu Choi, “A Study on the Development of Ceramic Ferrule Machining Process for Optical Connector,” Korean Society of Precision Engineers, Vol. 9, No. 3, 1992.
3. Hong-Bae Kim, “A Study on the Ultra-precision Mirror Finishing Using the System of Experiments,” Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 7, No.5, pp.134-139, 1998.
4. Min-Seog Choi and Jeong-Du Kim, “Stochastic Approach to Experimental Analysis of Cylindrical Lapping Process,” Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 17, No. 10, pp.2509-2517, 1993
5. Eun-Sang Lee, Jeong-Du Kim, Nam-Hun Kim, “Plunge grinding characteristics using the current signal of spindle motor,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 132, pp.58-66, 2003
6. Eun-Sang Lee, Nam-Hun Kim, “A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor,” Vol. 41, pp.937-951
7. F. Hashimoto, G. D. Lahoti, M. Miyashita, “Safe Operations and Friction Characteristics of Regulation Wheel” Annals of the CIRP Vol. 47, 1998.
8. W. B. Rowe, M. Miyashita, W. Koenig, “Centerless Grinding Research and its Application in Advanced Manufacturing Technology” Annals of the CIRP Vol. 38, 1989.