

연삭가공에 있어 비가공 시간 단축에 관한 연구(I)

- 음향센서를 이용한 공연삭 시간의 단축-

김 선 호*, 안 중 환**

Reducing the Non Grinding Time in Grinding Operations(1st Report)

- Reducing the Air Grinding Time Using Sound Sensor -

Sun Ho KIM*, Jung-Hwan AHN**

ABSTRACT

Air grinding time in grinding process has a great effect on its efficiency due to low feedrate. This paper presents a reduction method of air grinding time in cylindrical plunge grinding operations. The reduction of air grinding time is accomplished by finding the distance between contact point and rising point of ultrasonic signal of the grinding wheel to workpiece. It uses a variation of sound signal generated by the flow of coolant when the grinding wheel approaches to workpiece. The ultrasonic sensor with 23 kHz center frequency and 8 kHz bandwidth is used to find the nearest approaching point(NAP). Monitoring and control system of the grinding conditions is implemented with CNC controller to control feedrate override and ultrasonic sensor to find NAP. The experimental result shows that the ultrasonic signal is a good measurement to find NAP. But it needs the considerations for the effect of the relationship between flowrate of coolant and diameter of workpiece.

Key Words: air grinding time(공연삭시간), sound sensor(음향센서), ultrasonic sensor(초음파센서), the nearest approaching point(NAP:접근점), contact point(CP: 접촉점)

1. 서 론

경도가 높은 소재를, 높은 치수 정밀도와 표면조도를 얻기 위한 기계가공중의 하나인 연삭작업은 다른 기계가공에 비해 이송속도가 낮으며 비가공시간이 비교적 긴 특징을 갖는다. 이러한 비가공시간은 연삭숫돌의 밸런싱

(Balancing), 드레싱(Dressing) 등과 같은 가공외적인 요인과 공연삭(Air Grinding) 시간 등 가공내적인 요인이 있다. 연삭공정에서 비가공시간을 단축시켜 생산성을 높이기 위해서는 연삭공정을 자동으로 감시하고 감시결과에 따른 비효율적인 요소의 제거 및 감시결과를 이용한 적절한 제어가 필요하다.⁽¹⁾

* 한국기계연구원 자동화연구부

** 부산대학교 기계공학부

연삭가공물은 높은 경도를 얻기 위해 연삭전에 열처리 공정을 거치는것이 일반적이며, 열처리과정에서는 다소간의 차이는 있으나 열처리변형이 수반되어, 연삭가공시 스톨과 공작물의 상대위치를 일정하게 유지하기가 어렵다.⁽²⁾ 일반적으로 CNC 연삭기를 이용한 원통 프런지 연삭공정은, 연삭스톨이 공작물의 접근여유를 고려한 위치까지 급속이송을 하고, 그 후 연삭이송 속도로 공작물에 접근한다. 그러나 열처리된 가공물을 연삭가공하는 경우, 형상 변형량은 일정하지 않기 때문에, 연삭스톨의 접근여유를 변형량의 최대값으로 설정하여 작업을 수행하게 되어 공연삭시간이 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 스톨과 공작물간의 상대위치를 센서에 의해 검출하고 급속이송에서 연삭이송으로 전환하는 위치 즉, 접근여유를 공작물의 상태에 따라 달리 결정할 필요가 있다.

본 연구에서는 원통 프런지 연삭공정에서 연삭기의 스톨 덮게에 설치한 초음파센서를 이용하여 스톨과 공작물의 접근상태를 검출하고, 그 신호에 의해 적절히 이송속도를 제어함으로써 공연삭시간을 단축하는 것에 관한 연구를 했다. 아울러 연삭액 유량이나 공작물의 직경변화 등 연삭조건이 초음파신호의 발생특성에 미치는 영향에 대해서도 검토를 하고 대안을 제시 했다. 이와 같은 결과들은 CNC 연삭기의 오버라드(Override) 기능을 개조하여 제작한 스톨·공작물 접근상태 감시 및 이송속도 제어 시스템을 이용하여, 기존방법과 비교 실험을 통해 공연삭시간 단축 가능성을 확인 하였다. 본 논문에서는 이러한 연구내용들을 소개한다.

2. 연삭공정의 모델화와 공연삭 시간

Fig. 1에 원통 프런지 연삭공정에서 스톨이 원점에서 이동하여 공작물에 접촉 할 때까지의 시간변화를 가로축에 그리고 스톨과 공작물의 상대위치를 세로축에 나타내었다.

Fig. 1(a)는 접근센서나 접촉센서를 사용하지 않는 일반적인 연삭공정을 나타낸 것으로서 연삭스톨이 원점 P_0 에서 공작물과 스톨의 접근여유를 고려한 P_q 까지는 급속이송(F_a)을 행하고, P_q 부터 연삭 이송속도(F_G)로 전환하여 공작물에 접근하여 P_c 에서 공작물과 접촉한다. 급속이송 구간인 P_0 부터 P_q 까지는 이송시간이 극히 짧은데 비해, P_q 부터 P_c 까지는 거리는 짧지만 이송속도가 0.05~0.2mm/min.에 불과하기 때문에 많은 시간이 소요되어,

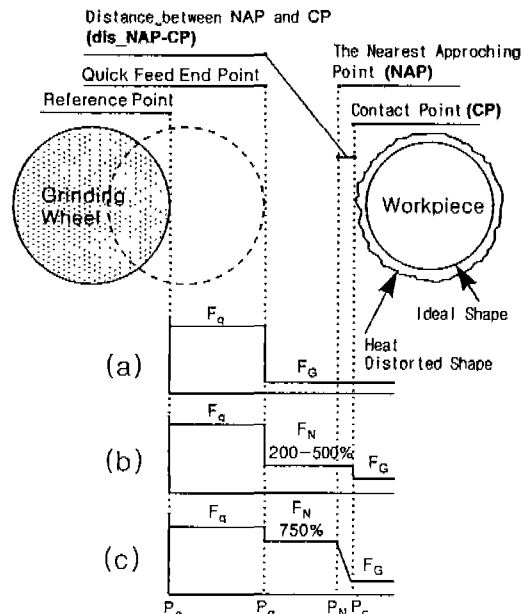


Fig. 1 Modeling of cylindrical plunge grinding process

이 부분이 공연삭시간의 대부분을 점하게 된다. 특히 P_q 점과 P_c 간의 접근여유는 앞 공정에서 발생한 열처리 변형량의 최대값으로 설정하는 것이 일반적이기 때문에 열처리 품질에 따라 공연삭시간은 증가하게 된다.

Fig. 1(b)는 P_0 부터 P_q 까지는 급속이송 그리고 P_q 부터 P_c 까지는 접근이송을 하고 P_c 를 AE 센서 및 주축모터의 부하전류 등을 이용해 검출하여 P_q 부터는 연삭 이송속도로 이송하는 방법을 나타낸 것이다.^(3,4,5) 즉, P_q 부터 P_c 까지를 연삭이송보다 빠른 접근 이송속도(F_N)로 이송하는 것에 의해 공연삭시간을 단축한다. 그러나 가공물이 원통 연삭에서 주로 가공되는 긴 봉형인 경우에는 열처리시 반경 방향 뿐 아니라, 길이방향으로 휘어지는 현상이 발생한다. 이러한 열처리변형이 발생한 공작물을 연삭하는 경우, Fig. 2와 같이 2가지 유형의 연삭력 발생 현상이 일어날 수 있다. 즉, 접촉점에서 스톨이 공작물의 변형 편심

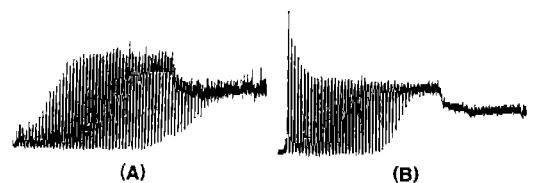


Fig. 2 Contact patterns between wheel and workpiece

외측에 부딪치는 경우는 (a)와 같이 연삭저항이 점차적으로 증가하지만, (b)의 경우처럼 변형 편심 내측에 부딪치는 경우는 공작물과 슷들의 접촉초기에 과도한 연삭력이 발생한다. 이러한 경우에 Fig. 1(b)와 같은 방법을 적용할 경우 슷들과 공작물 사이에 반복적인 과도한 연삭력이 발생해서 슷들의 피로현상등 악영향을 주게 된다. 이러한 현상과 제어계 등의 지연 및 안전을 고려하여 접근이송은 연삭이송의 2-5배 정도 이상은 높이기 어렵다.

본 연구에서 제안하는 공연삭시간을 줄일 수 있는 방법을 Fig 1.(c)에 나타내었다. 그 특징은 슷들 덮개에 설치한 초음파센서에 의해 검출한 슷들과 공작물의 접근상태를 기초로, 슷들의 이송속도를 급속이송(F_q), 접근이송(F_N) 및 연삭이송(F_c) 등 3단계 제어를 행한다. 즉, 원점 P_0 에서 P_q 까지는 급속이송, P_q 부터 P_N 까지는 접근이송을 행하고, 접근중 접근점 P_N 을 검출하여, 접근점 부터는 이송속도를 순차적으로 감소 시켜 접촉 직전에 접근이송을 연삭이송으로 전환하는 것에 의해 공연삭시간을 단축한다.

3. 접촉 및 접근상태의 검출

스�들과 공작물의 접근·접촉상태를 검출하기 위해, 음향의 저주파 영역 측정이 가능한 마이크로 폰(Micro Phone, 10Hz-50KHz)과 고주파영역 측정이 가능한 AE(Acoustic Emission) 센서(50kHz-100kHz)를 사용하였다. 여기서 마이크로 폰은 슷들과 공작물의 접근상태에 따른 음향신호의 분석, AE 센서는 공작물과 슷들의 접촉시점을 인식하여 공작물과 슷들의 상대위치를 감시하기 위한 기준신호로 사용되었다.

Fig. 3은 2개 센서의 설치위치와 신호처리법을 나타낸 것이다. AE 센서는 가공점으로 부터 신호 전달경로가 최소가 되도록 원통 연삭기의 심압대 위에, 그리고 마이크로 폰은 음향의 지향성을 고려하여 슷들 덮개에 가공점을 향하도록 설치 했다. 마이크로 폰 신호는 사운드 레벨 미터(Sound Level Meter)를 경유하여 RMS 처리를 하고 AE 신호는 증폭기에서 100kHz의 고주파 필터(High Pass Filter)를 경유하여 RMS 처리를 했다. 모든 신호는 고속의 A/D 변환기에서 디지털 신호로 변환하여 신호 분석에 사용되었다.

연삭실험은 원통연삭기(주축 모터: 5.5kW)를 사용하여 원통 프런지 연삭을 수행했다.

실험에 사용된 공작물 및 가공조건은 Table 1에 나타

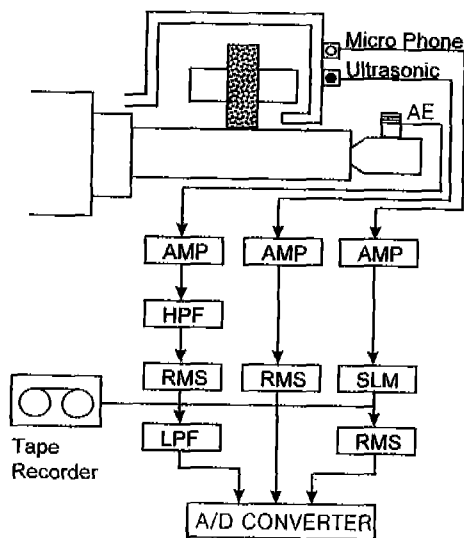


Fig. 3 Experimental setup

Table 1. Specification of experimental apparatus

Grinding Machine	. TSUGAMI GAIN (JPN)
Sensors	. AE (Murata) . Ultra Sonic (MA23L3) . 23KHz(Piezo Type) . Sound Level Meter(B&K 2230) . Micro Phone(50KHz)
Workpiece	. SM45C (H _{rc} 60) . SNC415M
Grinding Wheel	. SA80J7V75S72(Noritake) . 510X60X203.20
Grinding Conditions	. Grinding Wheel Speed : 2700m/min . Feed rate: 0.1-0.15mm/min

내었다.

스�들이 공작물에 접근하여 연삭이 시작 되는 과정에 있어서의 마이크로 폰과 AE 센서의 신호를 Fig. 4에 나타내었다. 이것은 열처리한 직경 25mm의 원통 연삭물(SNC415M)을 0.1mm/min.의 이송속도로 연삭을 했을때의 신호를 나타낸것이다. AE 신호는 슷들이 공작물에 접촉할때까지 레벨 값이 변하지 않지만, 슷들이 공작물에 접촉하면 에너지값은 급격하게 상승한다. 마이크로 폰의 에너지값은 슷들과 공작물이 접촉하는 시점 이전부터 상승하여 연삭가공에 들어간 후에도 변화가 없다. 이러한 결과를 이용해 마이크로 폰의 신호특성에 의해 슷들과 공작물의 간격을 그리고 AE 센서에 의해 슷들과 공작

물의 접촉시점의 감시가 가능하다는 것을 알 수 있다.

숫돌이 공작물에 접근할 때 마이크로 폰의 신호출력이 상승하는 원인을 찾기 위해 이산적 FFT 처리를 행한 결과를 Fig. 5에 나타 내었다. 숫돌과 공작물이 멀리 떨어진 상태에서 연삭액을 공급하면 연삭액을 공급하지 않은 경우에 비해 15-30kHz 영역의 에너지가 증가 한다. 숫돌이 공작물에 접근하면 20kHz 부근의 에너지가 서서히 증가하며, 숫돌이 공작물에 근접하게 되면 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 숫돌이 공작물에 접근하면 에너지가 증가하는 이유는, 기공을 가지고 있는 숫돌이 고속으로 회전할 때 숫돌표면에 공기막을 형성되기 때문이다. 숫돌·공작물의 간격이 좁아지면 고압의 공기막이 연삭액의 침투를 방해하여 그 때 발생하는 음파가 마이크로 폰에 의해 검출되는것으로 추정된다. (6.7 8.9)

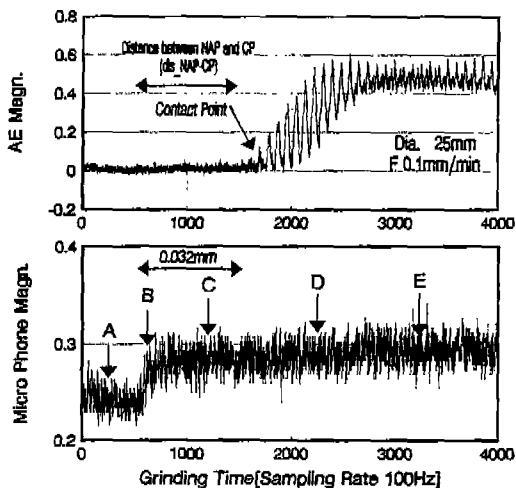


Fig. 4 AE & Micro Phone signals at contact point

마이크로 폰 신호를 주파수 분석한 결과, 숫돌이 공작물에 접근할때 20kHz 부근의 음이 상승한다는 점에 착안하여, 공칭주파수가 23kHz이고 20-25kHz의 대역(Bandwidth)를 갖는 방수형 초음파센서를 마이크로 폰과 동일한 위치에 설치하여, 마이크로 폰의 경우와 동일한 실험을 수행하였다. 이때의 초음파센서의 신호출력의 변화를 Fig. 6에 나타 내었다. 마이크로 폰과 동일하게 숫돌이 공작물에 접근하면 출력이 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있다.

초음파센서에 의해 숫돌·공작물의 접근상태를 검출할

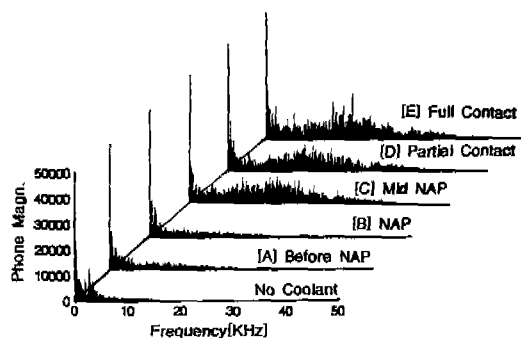


Fig. 5 Spectrum patterns of Micro Phone signals at contact point

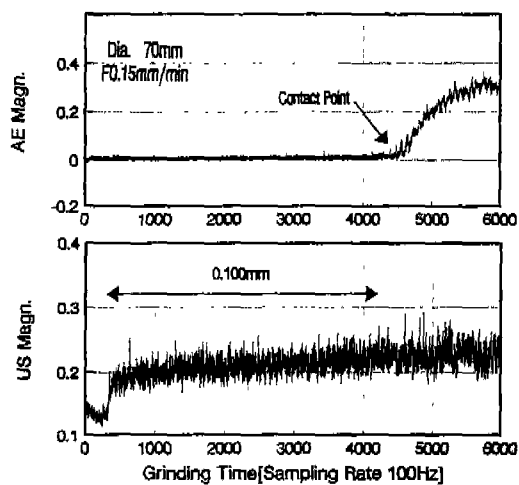


Fig. 6 AE & Ultrasonic signals at contact point

수 있다는 것을 판명 했으나, 공작물의 직경이 변화하면 숫돌·공작물간의 접촉환경이 변하기 때문에 초음파센서의 신호 발생 특성도 변화할 것이라 생각된다. 또한 연삭액 토출량의 변화도 초음파 발생특성에 영향을 줄 것이라 생각된다. 그래서 공작물의 직경이나 연삭액 토출량이 변화하는 경우, 초음파센서로 검출되는 숫돌·공작물 접근점이 어떻게 변화하는가를 실험에 의해 구했다. 또한 숫돌·공작물의 접근을 판단하기 위한 신호 레벨 기준은 신호출력이 초기신호에 비해 30% 이상 증가하는 시점을 접근점으로 인식하였다. Fig. 7은 초음파센서의 신호출력을 이용해 숫돌과 공작물이 접근한 것으로 인식된 점과 공작물의 직경과의 관계를 나타낸 것이다. 공작물 직경이 커지게 되면 초음파센서가 인식하게 되는 접근점은 공작물로 부터 멀어진다. Fig. 6의 관계로 부터 접근점

(NAP: the nearest approaching point) P_N 으로부터 접촉점(CP: contact point) P_C 까지의 거리 $dis_NAP-CP(mm)$ 는 공작물의 직경을 $D(mm)$ 라 하면 다음과 같이 구해진다.

$$dis_NAP-CP = 0.0014D$$

연삭액의 토출량과 초음파센서가 인식하는 접근점과의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

연삭액의 토출량이 증가하면, 초음파센서가 인식하는 접근점은 공작물로부터 멀어진다. 따라서 초음파센서를 이용하여 스톨과 공작물의 상대위치를 검출하기 위해서는 연삭액 토출량을 일정하게 할 필요가 있다.

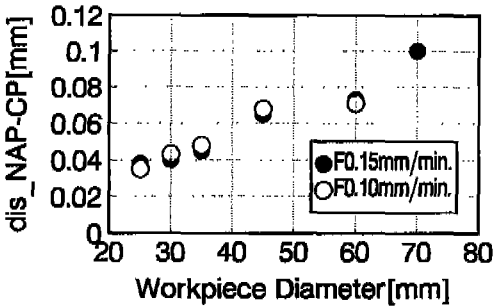


Fig. 7 Variation of distance between NAP and CP for different workpiece diameter

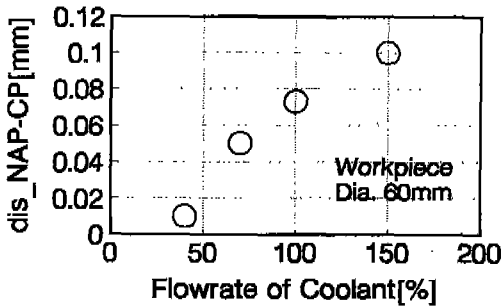


Fig. 8 Variation of distance between NAP and CP for different coolant flowrate

4. 접근상태 감시 및 이송속도 제어 시스템 구축

이상의 실험결과로부터 초음파센서의 신호출력을 이용해 공작물과 스톨의 접근상태를 검출하는 것이 가능하다

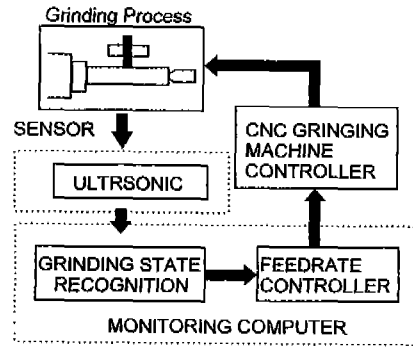


Fig. 9 Schematics of monitoring and control system

는 것을 알았다. 이러한 결과를 이용해 CNC 연삭기의 오버라이드 기능을 이용하여 이송속도를 급속이송, 접근이송 그리고 연삭이송으로 3단계 제어가 가능한 공연삭시간을 단축하는 시스템을 구축했다. 구축된 시스템을 Fig. 9에 나타내었다.

공연삭시간 단축 시스템은 스톨과 공작물의 위치관계를 검출하는 센서부, 센서신호를 이용하여 접근상태를 판단하는 연삭상태판단부, 판단결과를 기초로하여 이송속도를 제어하는 제어부 등 3부분으로 구성된다. 이송속도는 연삭기의 오버라이드 기능을 이용하여 CNC의 PLC 접점 151-154를 이용하여 0-150%를 10% 단위로 16단계로 제어가 가능하도록 했다. 이러한 제어를 수행하기 위해 하드웨어로는 PC측의 0X220번지를 이용하여 릴레이를 사용한 스위칭회로를 추가하였다.

구축된 시스템에 의한 공연삭시간의 단축효과를 확인하기 위해 실험을 수행했으며 Fig. 10에 실험장면을 나타내었다. 실험은 열처리한 직경 45mm의 S45C 환봉을 이

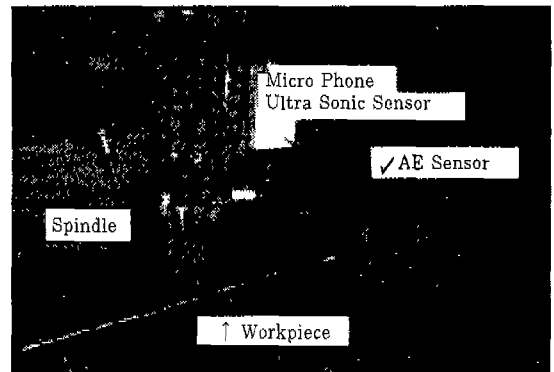
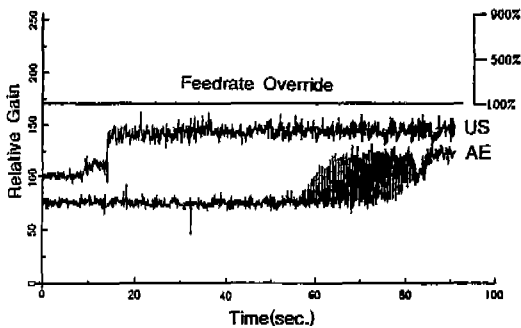


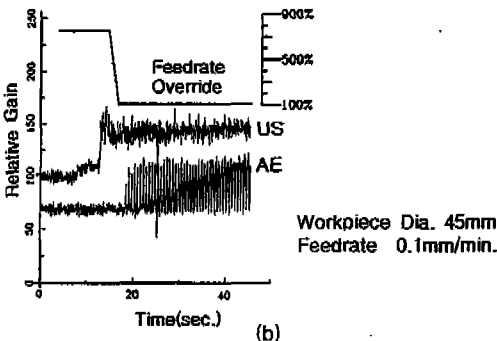
Fig. 10 Photograph of experimental apparatus

용하여 프런지 연삭을 수행했다. 연삭 이송속도는 0.1mm/min.으로 하고 접근속도는 0.75mm/min.으로 설정하여 수행하였다. 실험과정은 슷들을 원점 P₀부터 P_q까지는 G00 코드에 의해 급속이송을 행하고 P_q부터 접근점 P_N까지는 G01 코드를 사용하여 연삭이송의 7.5배인 0.75mm/min.으로 접근 시킨다. 접근이송중 연삭상태판단부가 접근점을 통과했다고 판단을 하면 그 때부터 100ms마다 10%(0.05mm/min)씩 속도를 낮추어 3.9초 후에 0.1mm/min.가 되도록 제어를 수행한다. 이와 같이 센서 신호를 이용하여 이송속도를 3단계로 제어한 실험결과를 감시제어를 수행하지 않은 연삭결과와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다.

시험제작한 연삭기를 사용하여 P_q와 P_C의 거리를 0.2mm로 설정하고 실험을 수행한 결과, 감시제어를 수행하지 않은 경우에는 총 120초가 소요되었는데 비해, 센서로부터 접근신호를 이용하여 제어를 수행한 경우에는 P_q부터 P_N까지는 14.3초 그리고 P_N부터 P_C까지는 7.6초가 소요되어 총 21.9초가 소요되었다. 따라서 공연삭시간이 98.1초 단축되었다.



(a)



(b)

Fig. 11 Experimental result by conventional grinding and using monitoring and control system

4. 결 론

본 연구에서는 원통 프런지 연삭에 있어서 슷들이 공작물에 접근할 때 연삭액의 흐름 변화에 의해 발생하는 음향신호를 이용하여 공연삭시간을 단축하는 방법에 대해 연구했다. 측정 센서로는 측정 주파수 범위가 넓은 마이크로 폰을 사용하여 음향신호의 주파수 분석을 행하고, 이러한 결과를 이용하여 주파수범위가 좁고 저가의 초음파센서를 사용하였다. 또한 슷들과 공작물의 접근상태를 감시하기 위해 AE 센서를 병용하였다. 초음파센서로부터 슷들과 공작물의 접촉상태를 검출하여 급속이송, 접근이송 그리고 연삭이송으로 제어가 가능한 연삭상태의 감시 제어 시스템을 구축하여 가공실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연삭액의 흐름변화로부터 발생하는 음향에너지는 슷들이 공작물에 접근했을 때 급격하게 증가 하기 때문에, 마이크로 폰이나 초음파센서에 의해 슷들과 공작물의 접근상태 검출이 가능했다.
- 2) 초음파센서로부터 슷들과 공작물의 접근상태를 검출하여 급속이송, 접근이송 그리고 연삭이송으로 제어가 가능한 공연삭시간 단축 시스템을 구축하여 가공 실험을 수행한 결과 공연삭시간 단축 효과가 있었다.
- 3) 슷들이 공작물에 접근했을 때 발생하는 음향신호는, 연삭액의 유량과 공작물 직경의 영향을 받기 때문에, 연삭액의 유량은 일정한 유지가 필요하며, 또한 공작물 직경은 실험식을 이용하여 보정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 清水伸二, "研削加工における非加工時間の短縮," 機械と工具, pp. 25-31, 1994, 2
2. 김선호, 정병철, 안중환, "원통 프런지 연삭공정의 감시/제어 시스템," 한국정밀공학회지, 제12권, 제 9호, pp. 66-73, 1995.
3. Kakino, Y. et al. "Detection of the Starting Time of Grinding by Making use of Acoustic Emission," J. of JSPE(In Japanese), Vol. 48 No.3, pp. 50-54, 1982.
4. Marposs s.p.a., Procuction Div. "Introduction for Installation and Used 2200001U1," Edition 02, 1990.

5. Hsieh, J. and Inasaki, I., "Monitoring of Dressing and Grinding Process with Acoustic Emission Signals," Trans. of JSME(*In Japanese*), Vol. 468, pp. 2174-2179, 1984.
6. Shibata, J. et al., "Characteristics of Air Flow Around a Grinding Wheel and Their Availability for Assessing the Wheel Wear," Annals of the CIRP Vol.31, pp. 233-238, 1982.
7. Matsui, S. et al. "Evaluation of Grinding Fluid Quantity in Wheel-Workpiece Interface," J. of JSPE(*In Japanese*), Vol. 49 No.6, pp. 772-777, 1983.
8. Goto, T. and Shibata, J., "Process for grinding Fluid Leaving the Nozzle to Reach the Contact Area," J. of JSPE(*In Japanese*), Vol. 50 No.9, pp. 150-156, 1984.
9. Schumack, M. R., "Analysis of Fluid Flow Under a Grinding Wheel," Transactions of the ASME, Vol. 113, pp. 190-197, 1991.