

원통 플런지 연삭공정의 감시/제어 시스템

김 선 호,* 정 병 철,** 안 중 환***

Monitoring/Control System for Cylindrical Plunge Grinding

Sunho KIM,* Byung-Chul Jung,** Jung-Hwan Ahn***

ABSTRACT

This paper presents monitoring and control system to decrease non-production time such as air grinding and partial contact in cylindrical plunge grindings. The 4-stage model of the plunge grinding process is proposed according to the state of contact between grinding wheel and workpiece; air grinding, partial contact, entire contact and spark out. Experimentally it is seen that the AE sensor and ultrasonic sensor are very effective to detect the grinding states. Monitoring and control algorithm using recognized grinding process was introduced and a experiment were conducted to verify the developed system.

Key Words : cylindrical plunge grinding, AE, ultrasonic, air grinding, partial contact

1. 서 론

기계가공의 최종단계인 연삭가공은 기계 가공중에서도 가장 비(非)가공시간이 많은 가공중의 하나이며, 제품의 요구 정밀도에 직접 영향을 미치는 중요한 공정이다.⁽¹⁾ 연삭가공에서 비가공시간을 줄여 생산능률을 높이기 위해서는 연삭숫돌의 밸런싱(Balancing), 드레싱(Dressing) 등과 같은 가공 외적인 요인의 개선과 공연삭(Air grinding), 부분접촉등과 같은 가공내적인 요인을 단축하는 것이 필요하다.⁽²⁾

연삭가공중 발생하는 가공 내적요인으로서의 비가공

시간을 줄여 가공 효율성을 향상하고, 요구되는 가공 정밀도를 유지하기 위해서는 연삭과정을 자동으로 감시하고 이상을 진단하여 적절한 제어를 수행하는 기술의 개발 및 도입이 필수 요소가 되고 있다.^(3, 4, 5, 6)

이러한 연삭가공에서는 가공전, 부품은 반드시 열처리공정을 거치는데 열처리 후에는 이에 따른 공작물 열변형을 수반하게 된다. 이는 연삭공정에 있어 공연삭(Air grinding) 시간과 부분접촉(Partial Contact) 시간을 증가시켜 고 능률화의 장애요인이 되고 있다.

본 연구에서는 이러한 비 능률적인 요소를 제거하기 위해 원통 플런지 연삭 공정을 대상으로 하여, 연삭기

* 한국기계연구원 자동화연구부

** 고등기술원

*** 부산대학교 정밀기계공학과

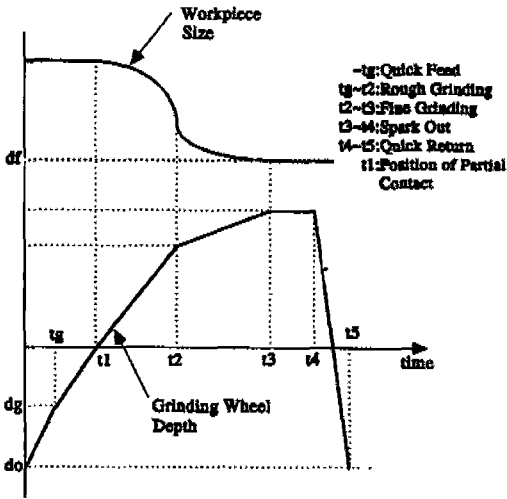


Fig. 1 Relationship between grinding wheel depth and workpiece size

의 심압대에 설치한 AE 센서와 스톨 뒷개에 설치한 초음파센서를 이용해 공작물과 스톨의 접촉상태를 감시하여 공연삭, 근접, 부분접촉, 완전접촉 및 스파크 아웃 상태를 검출하고, 이에 대응해 적절히 이송속도 제어를 수행함으로써 연삭 생산성을 향상시킬수 있는 시스템을 개발하였다.

2. 연삭공정 모델링

2.1 공작물-스톨의 기하학적 간섭 모델링

연삭공정에서 스톨의 위치와 공작물 기준면과의 상대 거리(간섭량) 변화를 Fig. 1에 나타냈다. 그림에서 보이듯이 플러지 연삭공정중 연삭스톨의 이송은 공작물과의 상대거리에 따라 급속이송(Quick feed) t_g , 공연삭(Air Grinding) $t_g \sim t_1$, 거친연삭(Rough Grinding) $t_1 \sim t_2$, 미세연삭(Fine Grinding) $t_2 \sim t_3$, 스파크 아웃(Spark out) $t_3 \sim t_4$, 급속귀환(Quick return) $t_4 \sim t_5$ 공정으로 나눌 수 있다. d_g 는 연삭을 시작하기 위해 스톨이 d_0 위치에서 급속으로 다가오는 위치로써 스톨과 공작물의 충돌을 피하기 위해 필요한 여유량을 나타낸다. 이 값은 열처리에 의한 공작물의 형상 변형량에 따라 조정하여야 하는 값으로, 공연삭 시간과 직접적인 관계를 가진다. t_g 에서 연삭이 시작되지만 t_1 까지 공연삭 시간을 나타내고, t_1 에서 t_2 는 실제 연삭공정으로서 부분접촉(Partial Contact), 완

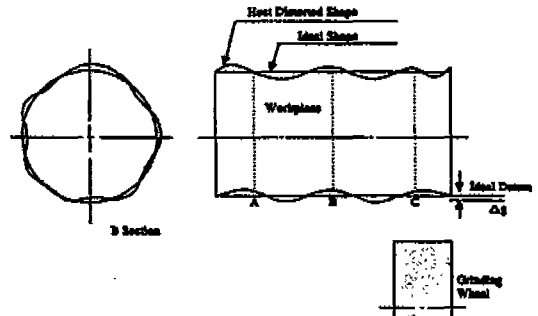


Fig. 2 Distorted workpiece model by heat treatment

전접촉(Full Contact)을 거치면서 연삭이 진행된다. 미세연삭을 마친 뒤에는 스파크 아웃이 진행되는데, 이는 연삭력에 의한 스톨의 탄성변형을 회복시켜 요구 치수 d_f 를 갖는 가공물의 정도를 얻기 위한 공정이다.

연삭의 가공 능률을 올리기 위해서는 공연삭 및 부분접촉 시간을 단축할 필요가 있으며, 공작물의 가공정도를 얻기 위해서는 스파크 아웃 시간의 감시 및 제어가 필요하다.

2.2 열변형된 공작물의 형상모델

연삭 가공품은 높은 경도를 얻기위해 연삭전에 열처리공정을 거치는것이 일반적이며, 열처리 공정에서는 필연적으로 열처리 변형을 수반한다. 열처리 변형은 길이가 짧은 원통 형상의 경우는 반경 방향의 치수를 변형시키지만, 본 연구의 대상품인 공작기계의 주축과 같은 긴 원통 형상의 경우는 반경 방향과 더불어 길이 방향으로 뒤틀림이 발생한다. 이러한 열변형 형상을 모델링하면 Fig. 2와 같고, 실 예로써 길이방향 세점(A, B, C)에서 45° 회전 위치에 따라 반경방향의 열변형량을 실측한 결과를 Table 1에 나타낸다. Table 1에 보이듯이 A, B, C 위치에서 최대반경은 각각 기준 반경에서 30, 50, 42 μ m을 더한 값이 된다. 따라서 연삭시에 스톨과 공작물의 충돌을 방지하기 위해서는 이상 기준면보다 스톨의 위치를 Δg 만큼 가공 여유량을 늘려야 하고, 이는 공연삭 시간을 증가시켜 생산성 저하의 원인이 된다.

생산성 향상을 위해서는 공작물의 열변형 정도를 실시간으로 측정하여 스톨의 여유량을 결정해야 하지만, 이것은 실현하기 어렵고 오히려 스톨과 공작물의 접촉 상태를 실시간에 감시하고, 그 결과에 따라 접근 이송

Table 1 Relative size after heat treatment

Measuring position	Measuring Angle position							
	R ₀	R ₀ +45°	R ₀ +90°	R ₀ +135°	R ₀ +180°	R ₀ +225°	R ₀ +270°	R ₀ +315°
A	0	+2	+20	+12	-16	0	+22	+30
B (A+80mm)	0	+36	+50	+36	+18	0	-18	-18
C (A+160mm)	0	+20	+32	+42	+38	+18	0	-20

R₀ : Reference Angle position

속도의 완급을 조절하는 것이 유리하다.

2.3 연삭가공에서의 AE 신호 생성 모델링

절삭가공에서 AE(Acoustic Emission) 신호의 에너지량은 AE 발생량으로 해석이 가능하다.⁽⁷⁾ 연삭가공시 발생하는 AE 신호의 에너지 변화를 dE_{AE}/dt 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{dE_{AE}}{dt} \propto [AE_{rms}]^2$$

이때 공작물과 스톨 사이에 발생하는 소성변형에 의한 에너지 변화율 \dot{w} 는

$$\dot{w} = \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot \dot{v}$$

로 표시가 가능하며, 소성 변형일 중에서 AE 발생에 소비되는 AE 신호의 에너지 비율이 항상 일정하다면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{dE_{AE}}{dt} \propto [AE_{rms}]^2 = c \cdot \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot \dot{v}$$

$\frac{dE_{AE}}{dt}$: AE 에너지 변화율

c : 비례상수

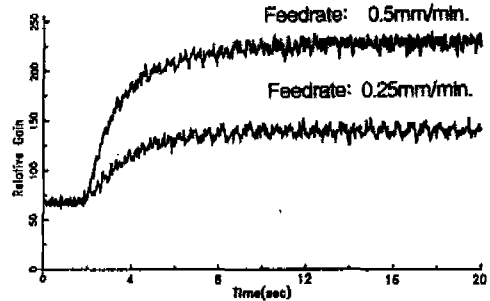
$\dot{\epsilon}$: 변형율

σ : 부하응력

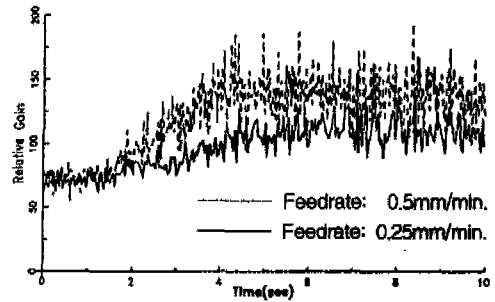
\dot{v} : 변형된 재료의 체적

따라서 연삭 영역의 확대는 AE 신호 에너지를 증가시키며, 이러한 AE 신호는 연삭저항과 비례관계가 있다.⁽⁸⁾

연삭공정중 연삭량의 증가에 따른 AE 신호에너지의 변화를 보기 위해 2가지의 이송속도에 대해 실험을 수



(a)



(b)

Fig. 3 Change of AE(a) and ultrasonic(b) signal with variations of feedrate

행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 정상절삭 상태에서 AE 신호의 레벨이 이송속도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 초음파의 경우에도 신호 레벨이 AE 신호와 비슷한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.4 절입속도에 따른 연삭공정 모델링

공작물이 동일한 반경을 갖는 경우, Fig. 4와 같이

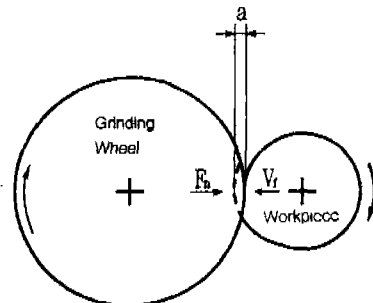


Fig. 4 Model of cylindrical plunge grinding

숫돌과 공작물의 접촉이 이루어진 후 이송이 진행되면 반경방향의 연삭저항(F_n)이 작용하여 연삭숫돌이 변형을 일으킨다. 이 상태는 이송량을 f , 이송속도를 V_f , 실 절입깊이를 a , 실 절입속도를 V_a , 공작물과 연삭숫돌의 탄성에 의한 변형량을 δ 라 할때 반경방향의 연삭저항은

$$F_n = \alpha V_a$$

라 가정하면

$$\delta = \frac{F_n}{k}$$

라 할 수 있고, 이때 실 절입깊이가 a 는

$$a = f - \delta$$

이 된다. 윗 식은 다시

$$a = f - \frac{\alpha}{k} V_a$$

로 쓸 수 있으며, 윗식의 양변을 미분하면

$$V_a = V_f - \frac{\alpha}{k} \frac{dV_a}{dt}$$

$$\frac{\alpha}{k} = \tau \text{ 라 하면}$$

$$V_a = V_f(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{1}$$

이 되어 이송속도 V_f 가 일정하면 실 절입깊이는 이송량 f 를 따라가게 된다.⁽⁶⁾ 또 스파크 아웃이 진행될 때의 실절입 속도 V_a 를 유도해 보면 $V_f=0$ 이고, $[V_f, V_a]$ 의 구간에서 적분하면

$$V_a = V_f e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{2}$$

이 된다. Fig. 5는 식(1)과 식(2)를 이용해 거친연삭 공정(이송속도: 0.1mm/min)의 진행에 따른 이론적 절입속도를 나타낸것이다. 이는 AE의 신호레벨과 잘 일치하고 있다. 그러나 연삭 전처리 단계에서 열처리에 의한 공작물의 치수 불균일이 수반됐을 경우 불균일한 형상에 따라 실절입 속도는 다른 모습을 나타낸다. 실 연삭의 경우에는 공작물 표면중에서 연삭 숫돌과 가장 먼저 접촉하게 되는 부분에서도 연삭 숫돌이 이송됨에 따라 식(1) (2)와 동일한 실절입 속도를 가진다고 볼

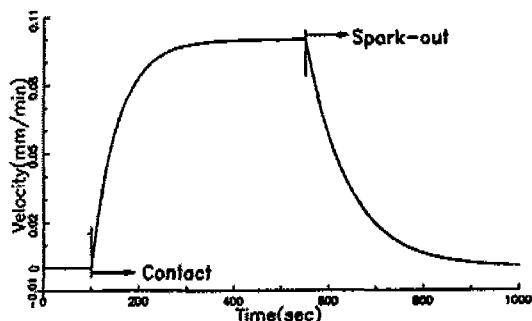


Fig. 5 Grinding feedrate modeling

수 없다.

3. 연삭 실험

3.1 연삭공정 변화에 따른 센서 신호 특성

Fig. 6는 열처리 변형부를 제거한 공작물 (SM45C (HRC10))을 반경 방향으로 0.1mm/min 이송속도로 0.05mm 만큼 이송시켰을때의 AE 신호 변화의 모습을 나타낸 것이다. AE 신호의 신호 레벨이 상승하기 시작하여 정점에 이를 때까지 4초 정도의 시간이 소요되며, 절입 깊이의 변화에 따라 AE 신호의 레벨이 변하고 있다. 절입량의 변화와 공작물 반경의 감소량이 동일한 시점에서 레벨의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 또 이송 속도가 0이 되는 시점에서 AE 신호의 레벨이 감소하기 시작하며 스파크 아웃 상태로 들어간다. 스파크 아웃 상태로 돌아가면 AE 신호의 레벨이 감소하기 시작하며, 일정 시간이 지나면 공절삭 상태와 동일하게 유지된다.

Fig. 7은 공연삭 후 숫돌과 공작물의 접촉 개시점 전후에서의 신호특성을 나타낸다. 그림에서 보이듯이

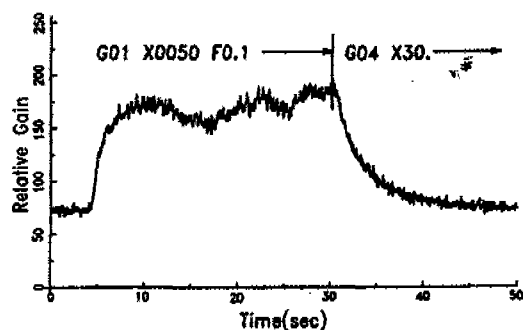


Fig. 6 Change of AE signal at 1 cycle grinding process

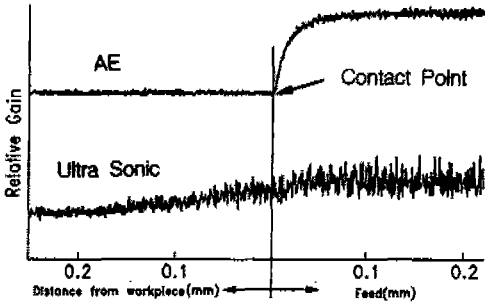


Fig. 7 Change of AE and ultrasonic signal at contact point between grinding wheel and workpiece

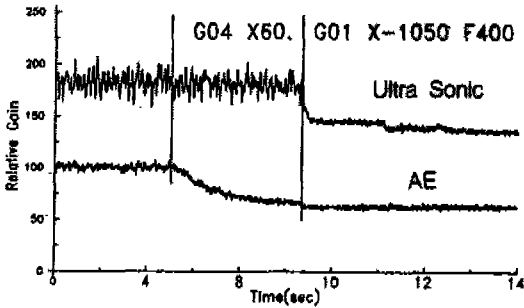


Fig. 8 AE and ultrasonic signal at spark out

초음파 검출기의 신호는 AE의 신호보다 먼저 반응하고 있음을 알 수 있다. 이는 공작물과 연삭 스톨의 간격이 좁아짐에 따라 그 틈을 흐르는 연삭액과 공작물에 부딪히는 연삭액에서 발생하는 초음파 신호로 판단된다. 연삭액 흐름에 의해 접촉전(Precontact) 상태에서 AE 신호가 상승을 시작하기 전에 초음파 센서의 신호가 미리 상승되고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 스톨과 공작물이 곧 접촉하게 될 것을 예측하는 주요한 신호특성으로 연삭공정 감시에 이용이 가능하다.

Fig. 8은 스파크 아웃 단계에서의 AE와 초음파 센서의 신호를 나타낸다. 연삭이 스파크 아웃 상태로 들어갈 때 AE 신호가 감소되기 시작하고 공작물과 스톨이 떨어질 때 동시에 초음파의 레벨이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 스파크 아웃 지속시간과 제품의 치수 정도

스파크 아웃 동안은 실제 이송은 되지 않지만 스톨의 압축 탄성 변형분이 회복되기 때문에 연삭이 이루어지

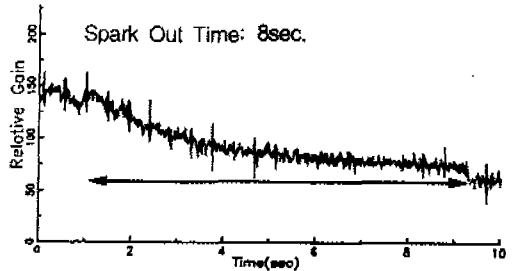
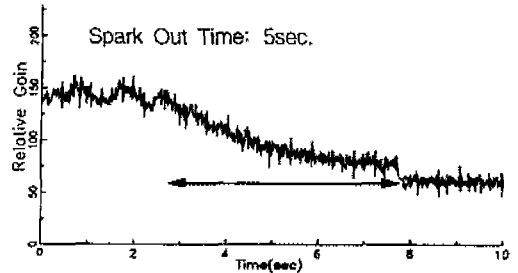
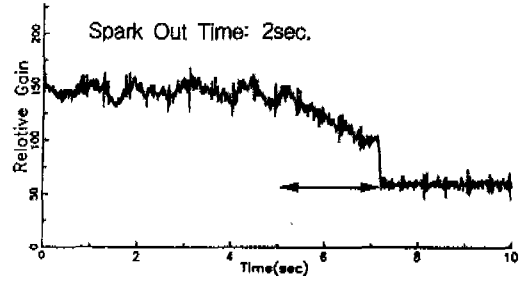


Fig. 9 Change of AE signal with variations of spark out time

고 있다. Fig. 6에서 보듯이 연삭량이 지수함수적으로 줄어들고 있는데, 문제는 스파크 아웃 지속시간을 얼마나 할 것이냐이다. Fig. 9는 동일 재질의 공작물에 대해 스파크 아웃 시간을 2초, 5초, 8초 동안 지속하였을 때 AE 신호의 변화를 보인 것이다. 스파크 아웃의 지속 시간에 따른 AE의 레벨이 차이가 남을 알 수 있다. Fig. 10은 스파크 아웃 시간에 따른 AE 신호의 레벨과 공작물의 치수를 나타낸 것이다. 따라서 AE 레벨의 변화 정보를 이용함으로써 제품의 정밀도도 유지하면서 스파크 아웃 시간을 최소로 제어할 수 있다.

4. 연삭공정의 감시 제어

생산성 향상을 위해서는 비가공시간 즉 공연삭, 부분

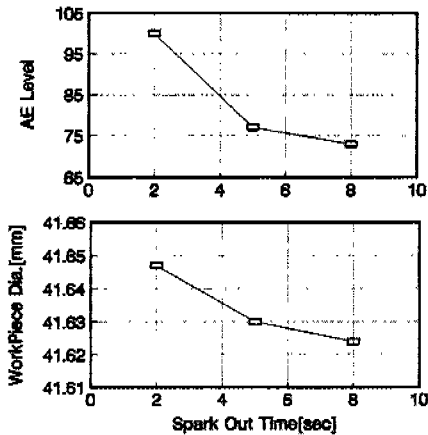


Fig. 10 Relationship between AE signal level and workpiece size with variations of spark out time

Table 2 Specification of experimental apparatus

Grinding Machine	TSUGAMI GAIN (JPN)
Sensor	AE (Murata) Ultra Sonic (MA23L3) 23KHz(Piezo Type)
Workpiece	Material : SM45C (HRC 60) Size : $\phi 45 \times 400\text{mm}$
Grinding Wheel	A80L8V
Grinding Conditions	Grinding Wheel Speed : 2700m/min Feed rate : 0.1mm/min

시스템은 연삭의 상태 신호를 얻기 위한 센서부, 검출된 신호를 이용해 상태를 판정하는 상태 판단부, 그리고 판단된 결과를 이용해 연삭기를 제어하기 위한 제어부로 구성했다.

연삭공정중 연삭의 상태를 검출하기 위해 AE 센서와 초음파 센서를 병용하였다. AE 센서의 경우에는 AE 센서 신호의 전달 경로의 최소화, 부착위치의 용이성등을 고려해 연삭기의 심압대에 부착했으며, 초음파 센서의 경우 초음파가 공기중으로 전달되고, 지향성을 가지기 때문에 작업면과 가까운 위치에 있는 슷들의 덮개에 설치했다. 측정된 두 신호는 모두 증폭기를 거쳐 증폭하고 RMS 값을 취한 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터로 입력된다. 컴퓨터의 감시/제어부에서는 연삭상태를 판단하여 NC 연삭기의 feedrate override 회로를 개조한 이송속도 제어기(feedrate controller)를 통해 슷들의 이송속도를 제어했다. 표 2에 사용된 실험장치를 나타낸다.

감시결과 공연삭 상태로 판정되는 경우에는 기준속도의 7.5배, 근접의 경우에는 기준속도의 2배, 부분점착 및 완전점착 상태에서는 기준속도의 이송을 갖도록 제어 알고리즘을 구성했으며, 스파크 아웃 상태가 활성화 되면 외부로 경고 신호를 내도록 하였다.

Fig. 12는 이송속도 오버라이드 회로를 제어하기 위해 제작한 제어기 회로도이다.

4.2 감시/제어 결과

감시 제어 시스템의 성능을 확인하기 위해 Fig. 13과 같은 시편을 이용해 실험을 수행했다. Fig. 14는 감시/제어 시스템 없이 NC 프로그램에 주어진 대로 이송속도 0.1mm/min, override 100%로 가공했을 때의 신호모습이다. 초음파 신호보다 AE 신호가 50초 정도

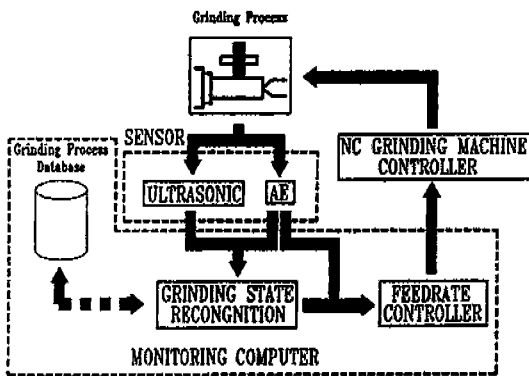


Fig. 11 System configuration

접촉 시간을 단축해야 한다. 이때 비점착, 부분점착, 완전점착의 상태를 검출하여 과부하가 걸리지 않도록 이송속도를 적절히 제어해야 한다. 이런 목적으로 본 논문에서는 AE 센서와 초음파 센서로 부터 얻은 신호의 RMS 레벨을 이용해 진행중인 연삭공정에 대한 상태(공연삭, 근접, 부분점착, 완전점착)를 판정하고 그 판정에 따른 제어를 수행할 수 있는 연삭공정의 감시 제어 시스템을 구성하였다.

4.1 시스템 구성

본 연구에서 대상으로 한 원통 플런지 연삭의 공정감시 및 제어를 위한 시스템 구성은 Fig. 11과 같다. 이

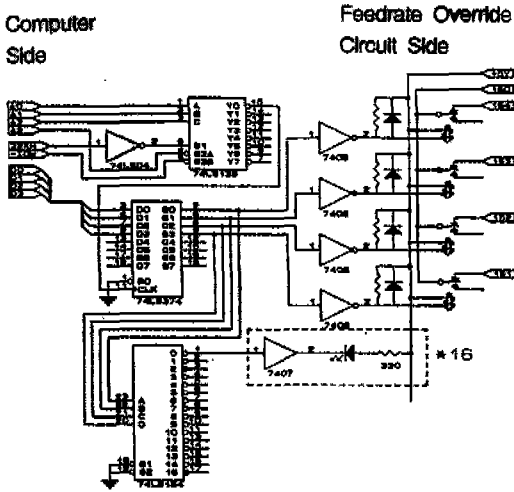


Fig. 12 Feedrate override controller

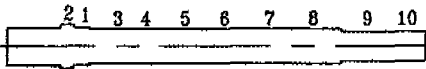


Fig. 13 Test workpiece and grinding procedure

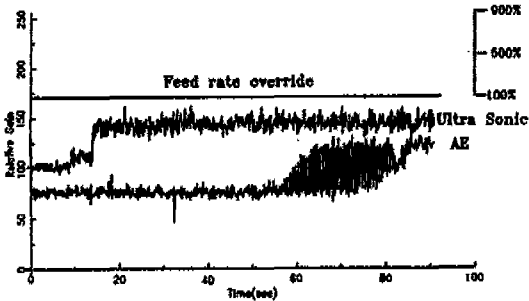


Fig. 14 Experimental result by conventional grinding(Feedrate override 100%)

늦게 반응함을 알 수 있다. 초음파 센서는 슷돌과 공작물이 0.08mm 정도로 근접했을때 반응했다. AE 신호는 공작물과 슷돌이 접촉한 후 레벨이 정상적으로 증가하지 않고 크게 진동하며 상승한다. 이러한 AE 신호의 진동은 슷돌이 공작물에 부분접촉하기 때문에 발생하는 것이며, 완전접촉이 이루어질 때 AE 신호가 안정되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 본 연구에서 개발한 감시/제어 알고리즘을 이용해서 상태를 판단하고 제어를 수행했을 때의 실험

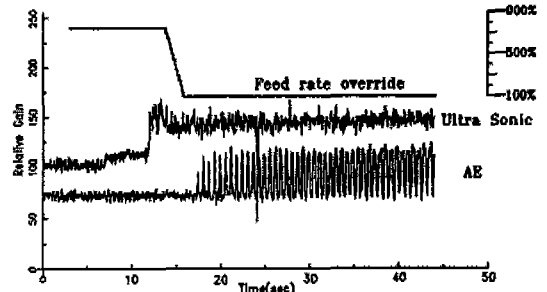


Fig. 15 Experimental result using monitoring and control system (Feedrate override 750-100%)

Table 3 Comparison of grinding time

감시 및 제어 방법	가공시간
기존 방법에 의한 가공	37분 6초
개발된 감시/제어 시스템에 의한 가공	20분

호모습이다. 초음파 센서에서 신호가 검출되고 약 10초후 AE 신호가 검출됨을 알 수 있다. 근접 간격이 0.08mm 정도임을 고려하여 override를 공연삭시에 해당하는 75%(0.75mm/min)에서 10ms의 간격을 두고 50%(0.05mm/min)씩 속도를 줄여 기존 이송속도인 100%(0.1mm/min)로 제어되었다.

Table 3은 연삭공정의 감시/제어를 수행했을 경우 작업 소요시간과 기존의 방법에 의한 작업 소요시간을 나타낸다. 기존의 방법에 의한 작업 소요시간은 항상 일정하였지만 연삭공정의 감시/제어를 수행했을 경우는 공작물의 열변형 상태에 따라 다소 가공시간이 달라졌다.

5. 결론

본 연구에서는 NC 원통 연삭기에 AE 및 초음파 검출기를 부착하고, 이로부터 검출한 신호를 이용해 연삭공정의 상태를 판별하고, 각 상태에 대해 적절히 이송속도를 제어하여 연삭능률을 높일 수 있는 감시 및 제어 시스템을 개발했다. 이러한 시스템 개발을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AE 신호를 사용하여 공작물과 슷돌의 접촉 개시점을 검출할 수 있었으며, 초음파 신호를 이용하여 공작물과 슷돌간의 근접 상태를 검출할 수 있었다.
- 2) 스파크 아웃 시간 변화에 따른 AE 신호의 레벨과

가공물의 치수 정도와의 관계를 이용해 가공물의 치수 정도 관리가 가능했다.

3) 공작물과 슷들의 접촉상태에 따라 이송속도를 급속이송, 근접이송, 기준이송으로 제어함으로써 비 가공 시간을 줄이고, 생산성을 높일 수 있었다.

후 기

이 연구는 93년도 학술진흥재단 지방대육성과제지원에 의한 결과이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

6. 참고문헌

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, 1994. 2
2. 武野仲勝, "進んだ研削作業", 應用機械工學, 1994. 4
3. 垣野義昭, 江田弘, 貴志浩三, 山田卓郎, 藤原彰彦 "アコースティックエミッションを用いた砥石・工作物接觸開始時期の検出法, 精密機械, 48卷 3,

- 1982.
4. Fu, J., C., Mori, K., and Yokomihi, M. "Application of entropy functions in on-line vibration classification for cylindrical plunge grinding", Int. J. prod. Res., No.6, 1994.
5. 米田孝夫, "研削加工における知能化", 機械の研究, 第44卷 10號, 1992.
6. Inasaki, I. "Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process", Annals of the CIRP Vol.40, 1991.
7. Elijah, K. A. and Dornfeld, D., "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Trans. ASME, Ser. B. 103. 3. 330., 1981.
8. Dornfeld, D. and He Gao Cai, An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission", Transactions of the ASME, Vol.106, 1984.