

# 원통연삭에 있어 비가공시간 단축기술

김선호, 박화영

한국기계연구원 자동화연구부

Sunho Kim, Hwayoung Park, Automation Eng. Dept., KIMM

본 연구에서는 원통 프린지 연삭에서 비가공시간을 줄이기 위해, 공연삭시간 단축과 드레싱 신호를 이용한 슬돌 손상상태 검출에 관한 연구를 수행했다. 연삭기의 심압대에 설치한 AE센서와 슬돌 덮개에 설치한 초음파센서를 이용해 공연삭, 공작물과 슬돌의 근접, 접촉상태를 감시하고 이에 대응해 적절히 이송속도를 제어했다. 그리고 드레싱시 나타나는 AE 신호의 표준편차를 이용해 슬돌의 손상상태를 검출해서, 드레싱 기회에 대한 효과적인 정보를 제공함으로서 비가공 시간을 단축했다.

## 1. 서론

경도가 높은 소재를, 높은 치수 정밀도와 표면조도를 얻기 위한 기계가공중의 하나인 연삭작업은, 다른 기계가공에 비해 이송속도가 낮으며 드레싱등의 비가공시간이 비교적 길고 찾은 특징을 갖는다. 이러한 비가공시간은 연삭슬돌의 밸런싱(Balancing), 드레싱(Dressing)등과 같은 가공의적인 요인과 공연삭(Air Grinding) 시간등 가공내적인 요인이 있다.

연삭공정에서 비가공시간을 단축시켜 생산성을 높이기 위해서는 연삭공정을 자동으로 감시하고 감시결과에 따른 비효율적인 요소의 제거 및 감시결과를 이용한 적절한 제어가 필요하다[1,2,3]. 연삭공정을 자동으로 감시하기 위해 적합한 센서로는 AE, 연삭저항등이 이용되고 있으나 지금까지의 연구결과로는 AE가 우수한 것으로 알려지고 있다[2,4]. 또한 드레싱시에 발생하는 AE 신호를 이용해 연삭슬돌의 상태를 추정할 수 있다는 연구도 보고된 바 있다[5]. 이러한 연구결과를 바탕으로 연삭 생산성 향상을 위한 비가공시간 단축에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

연삭가공품은 높은 경도를 얻기 위해 연삭전에 열처리 공정을 거치는것이 일반적이며, 열처리공정에서는 다소간의 차이는 있으나 열처리변형이 수반된다.

종래의 일반적인 연삭에서는 이러한 열처리변형에 대비하기 위해 공작물과 슬돌간의 일정한 여유(Clearance)가 필요했다. 그러나 이 경우 불규칙적으로 발생하는 열처리변형에 대한 대책이 없어 가공여유량이 증가하고, 이는 가공시간의 증가를 초래해 비생산성의 요인이었다. 이를 해결하기 위해 슬돌과 공작물간의 접촉상태를 검출해서 이송속도를 연삭속도로 낮추는 방법이 개발되었는데 이를 그림1 a)에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 슬돌의 원점  $P_0$ 에서  $P_q$ 까지는 급속이송(Quick Feed)을 행하고  $P_q$ 부터는 G01에 의한 연삭이송을 한다. 이때  $P_0$ 에서 슬돌과 공작물의 접촉점  $P_c$ 까지는 이송속도의 200-300%의 Override로 이송을 한다. 그리고  $P_c$ 에서 이송속도

Override를 100%로 해서 비가공시간을 단축하는 방법이 개발되어 이용되어 왔다[6].

열처리시 공작물이 긴 Cylinder형인 경우에는 반경방향 뿐 아니라 길이방향으로 휘어지는 현상이 발생한다. 이러한 열처리변형이 발생한 공작물을 연삭하는 경우 그림2와 같이 2가지 유형의 연삭력 발생 현상이 일어날 수 있다. 즉 접촉점에서 슬돌이 공작물의 변형 편심 외측에 부딪치는 경우는 a)와 같이 연삭저항이 점차적으로 증가하지만, b)의 경우처럼 변형 편심 내측에 부딪치는 경우는 공작물과 슬돌의 접촉초기에 과도한 연삭력이 발생한다. 이러한 경우에 그림1의 a)와 같은 방법을 적용할 경우 슬돌과 공작물 사이에 반복적인 과도한 연삭력이 발생해서 슬돌의 피로현상등 악영향을 주게 된다. 또한 이러한 현상때문에  $P_q$ 에서  $P_c$ 까지는 이송속도 Override를 더 이상 높일수가 없다.

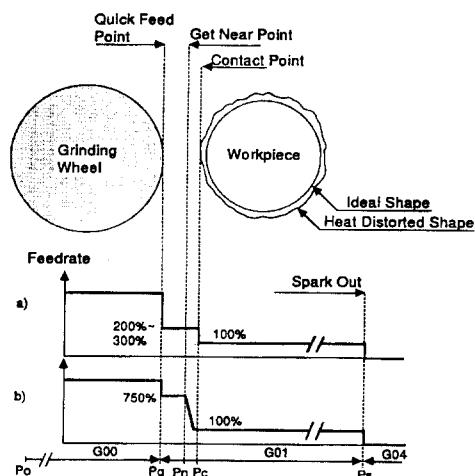


Fig. 1 Modeling of cylindrical plunge grinding

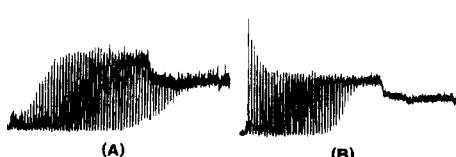


Fig. 2 AE signals

본 연구에서는 비가공시간을 줄이기 위해 가공내적 요인인 공연삭시간 단축과 가공외적 요인인 드레싱 신호를 이용한 솟돌상태 검출에 관한 연구를 수행했다. 원통 프런지 연삭을 대상으로 연삭기의 심압대에 설치한 AE센서와 솟돌 덮개에 설치한 초음파센서를 이용해 공연삭, 공작물과 솟돌의 근접, 접촉상태를 감시하고 이에 대응해 적절히 이송속도를 제어함으로서 비가공시간을 단축하고, 드레싱시 나타나는 AE 신호를 이용해 솟돌의 손상상태를 검출해서 드레싱 기회에 대한 효과적인 정보를 제공하는 시스템을 개발했다.

본 연구에서 개발한 공연삭시간을 줄일 수 있는 방법을 그림 1 b)에 나타내었다. 솟돌의 원점  $P_0$ 에서  $P_0$ 까지는 a)와 동일하게 급속이송(Quick Feed)을 행하고  $P_0$ 부터는 G01에 의한 이송을 한다. 이때  $P_0$ 에서  $P_c$  사이에서 발생하는 근접점( $P_N$  : Get Near Point)을 검출해서  $P_0$ 에서  $P_N$ 까지는 연삭 이송속도의 750%의 Override로 이송을 한 후  $P_N$ 을 검출한후  $P_c$ 까지 이송속도를 순차적으로 감소시켜  $P_c$ 에서 이송속도 Override를 100%로 해서 비가공시간을 단축한다.

## 2. 연삭신호의 생성 모델링

기계가공에서 AE(Acoustic Emission) 신호의 Energy량은 AE 발생량으로 해석이 가능하다[7]. 연삭가공시 발생하는 AE 신호의 Energy 변화율  $dE_{AE}/dt$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{dE_{AE}}{dt} \propto [AE_{rms}]^2 \quad (2.1)$$

이때 공작물과 솟돌사이에 발생하는 소성변형에 의한 Energy 변화율  $\dot{W}$ 는

$$\dot{W} = \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot \dot{V} \quad (2.2)$$

로 표시가 가능하며, 소성변형일중에서 AE 발생에 소비되는 AE 신호의 Energy 비율이 항상 일정하다면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{dE_{AE}}{dt} \propto [AE_{rms}]^2 = c \cdot \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot \dot{V} \quad (2.3)$$

여기서  $c$ 는 탄성계수,  $\dot{\epsilon}$ 는 변형율,  $\sigma$ 는 부하응력 그리고  $\dot{V}$ 는 변형된 재료의 체적률 나타낸다. 따라서 연삭영역의 확대는 AE 신호 Energy를 증가시키며, 이러한 AE 신호는 연삭저항과 비례적 관계가 있다[7]. 식 (2.3)에 나타나 바와 같이 연삭영역의 확대와 비례관계가 있는 AE 에너지의 변화율로부터 공연삭, 공작물과 솟돌의 접촉, 부분접촉, 완전접촉의 예측이 가능하다.

공작물과 솟돌 그리고 연삭액의 관계에서 발생하는 연삭음은 다음과 같은 관계가 있다. 연삭음 1개의 Beam이 직진하는 지향성을  $\varepsilon$ 라 하면

$$\varepsilon = \frac{D}{\gamma} \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

여기서  $\varepsilon$ 는 지향성,  $\lambda$ 는 파장( $\mu m$ ),  $c$ 는 음의 속도( $m/s$ ),  $f$ 는 주파수(Hz),  $D$ 는 음원의 직경( $mm$ )을 나타낸다. 식 (2.4)에 보이듯이 음의 지향성은 파장이 작을수록 즉, 주파수가 높을수록 크다. 따라서 연삭음을 감시대상으로 할 경우에

는 고주파음이 저주파음보다 유리하다는 것을 알 수 있다. 식 (2.5)에 보이듯이 연삭음의 주파수는 음의 파장만의 함수이기 때문에 솟돌과 공작물 사이의 간격변화에 따라 발생하는 음의 파장변화는 주파수의 변화에 영향을 준다.

## 3. 연삭실험 및 고찰

### 3.1 실험장치

연삭실험은 원통 연삭기를 이용해 프런지 연삭을 수행했다. 실험에 사용된 연삭기는 드레서가 심압대에 설치된 형태의 연삭기로서 주축은 5.5 KW의 AC 모터로 구동되며 회전수는 1740rpm으로 고정시켜 실험을 수행했다. 가공물은 S45C와 SNC415M 그리고 솟돌은 외경 510mm, 폭 60mm의 SA80J7V75S72가 사용되었다. 이송속도는 0.1-0.15mm/min.에서 실험을 했으며, 연삭 1 Cycle에서 공연삭, 근접, 부분접촉, 완전접촉을 관찰하기 위해 0.3-0.5mm 정도의 이송량 설정하고 실험이 수행되었다.

연삭공정중 연삭의 상태를 검출하기 위해 그림 3과 같이 실험장치를 구성했다. 연삭상태를 검출하기 위한 센서로는 AE, Micro Phone 그리고 초음파 센서를 병용했다. AE 센서의 경우에는 신호전달 경로의 최소화, 설치위치

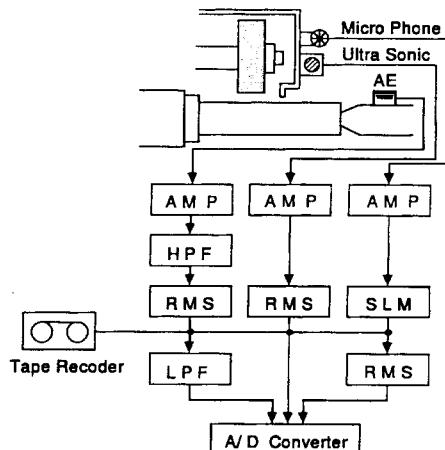


Fig. 3 Experimental setup

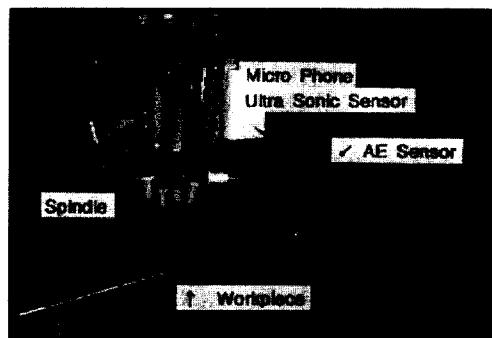


Fig. 4 Configuration of experimental apparatus

의 용이성등을 고려해 연삭기의 심압대에 부착했으며, Micro Phone과 초음파센서의 경우는 연삭음이 공기를 매체로 전달되고 지향성을 가지기 때문에 작업면과 가까운 위치에 있는 슷돌의 덮개에 부착했다. 측정된 AE 신호는 증폭기를 통해 증폭하고 100KHz의 고주파통과 필터를 거쳐 RMS 처리했다. 초음파센서의 경우에는 측정된 신호를 증폭하고 역시 RMS 처리했다. Micro Phone의 경우에는 측정된 신호를 증폭하고 이를 Sound Level Meter를 경유해 RMS 처리했다. 사용된 RMS 처리기는 아나로그 방식이 사용됐으며 각 신호는 테이프 레코더에 저장했다. 사용된 실험장치 구성도를 그림4에 나타냈으며 이에 대한 내용을 표1에 정리하였다.

### 3.2 슷돌과 공작물의 근접, 접촉상태 검출

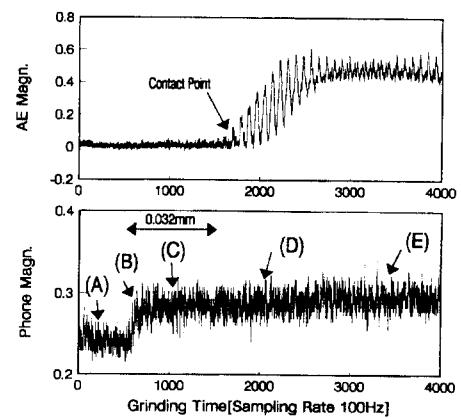
그림5는 연삭공정 갑시에 대한 각 센서의 신호특성을 파악하기 위한 각 신호의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 열처리된 SNC415M을 열처리 변형부를 제거한 후 반경방향으로 0.15mm/min의 이송속도로 연삭했을 때의 AE 센서와 Micro Phone 신호를 RMS 처리한 것이다. AE 신호의 경우 공연삭 후 슷돌과 공작물이 접촉한 후 부분 접촉을 하면서 신호레벨이 상승하기 시작하여 완전접촉이 이루어진 후는 신호를 레벨이 완만해 점을 알 수 있다. Micor Phone의 경우는 슷돌과 공작물이 접촉하기 전 약 32μm 지점에서 신호의 레벨이 증가함을 알 수 있다. 이러한 신호 레벨의 증가 원인을 분석하기 위해 연삭액이 없는 경우(No Coolant), 근접전(Before Get Near Point), 근접위치(Get Near Point), 근접영역(Mid Get Near Point), 부분접촉영역(Partial Contact), 완전접촉영역(Full Contact)에 대해 Micro Phone 신호를 이용해 4094개 디지털값을 이용해 이산적 FFT 처리를 수행한 결과를 그림5(b)에 나타내었다. 그림에서 보이듯이 연삭액의 유무에 따른 특징은 15-30KHz 영역에서 Power가 조금 증가하고 있다. 그 후 근접위치에서 레벨이 조금 증가해서 근접이 이루어 진 후에는 20KHz 영역을 중심으로 Power가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 근접 이후에는 동일한 특징을 갖는다. 이유는 공작물과 슷돌 사이의 간격이 어느 이하가 되면 슷돌의 회전력에 의해 슷돌과 공작물 사이에 고압 분위기의 Air Belt가 형성되어 연삭액이 거의 들어 갈 수 없는 상황이 된다. 이때에는 연삭액의 토출량이 증가하여도 이러한 현상에는 크게 영향을 주지 못한다[8]. 그러므로 연삭액은 흐르지 못하고 부딪치는 현상에 의해 고주파 연삭음이 생성되며 이러한 현상은 슷돌과 공작물의 접근상태를 검출하는데 유용한 정보가 된다. 이러한 연삭음의 특징을 이용해 연삭공정별로 초음파센서를 이용해 검출한 신호예를 그림6에 나타내었다. 사용된 초음파 센서는 공칭주파수가 23KHz로서 20-25KHz의 Bandwidth를 갖는 특성을 가지고 있다. 그림6 a)는 공연삭 후 슷돌과 공작물의 접촉 개시점 전후에서의 AE와 초음파 신호의 특성을 나타 낸것으로서 초음파 신호가 AE 보다 먼저 반응하고 있음을 알 수 있다. 그림6 b)는 스파크 아웃과 연삭슛돌의 후퇴(Wheel Retract) 위치에서의 AE와 초음파 신호를 나타낸다. 연삭공정이 스파크 아웃 단계로 들어 갈때는 AE의 경우는 연삭량의 감소에 의해 신호레벨이 감소하지만 초음파의 경우는 연삭액이 흐르지 못하는 이유로 감소하지 않는다. 그러나 연삭슛돌의 후퇴에 대한 특성은 AE의 경우는 레벨이 조금 감소하고 난 후 특징이 없으나 초음파의 경우는 근접점을 이탈한 후 레벨이 감소함을 알 수 있다.

### 3.3 드레싱 신호에 의한 슷돌상태검출

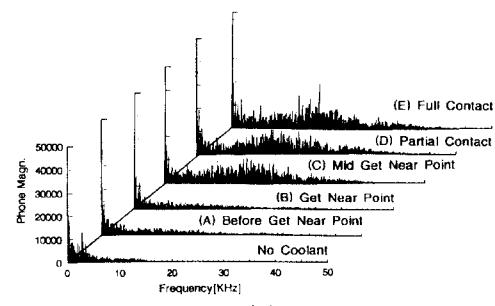
연삭가공에서 원하는 연삭성능과 연삭면을 얻기 위해서는 주기적인 드레싱 작업이 필요하다. 이러한 드레싱 작업이 효율적으로 이루어 지지 못할 경우 비가공시간의 증가 뿐 아니라 슷돌의 수명을 감소 시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 드레싱시에 발생하는 AE 신호의 표준편차를 이용해 슷돌 손상상태를 예측 할 수 있는 방법을 제안한다. 슷돌의 손상깊이를 측정할 수 있는 직접적, 간접적 여러가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 드레서를 이용해 슷돌표면을 일정깊이 손상 시킨 후 이를 드레싱 할

Table 1. Specification of experimental apparatus

Grinding Machine	TSUGAMI GAIN (JPN)
Sensors	<ul style="list-style-type: none"> <li>· AE (Murata)</li> <li>· Ultra Sonic (MA23L3)</li> <li>· 23KHz(Piezo Type)</li> <li>· Sound Level Meter(B&amp;K 2230)</li> <li>· Micro Phone(50KHz)</li> </ul>
Workpiece	<ul style="list-style-type: none"> <li>· SM45C (HRC 60)</li> <li>· SNC415M</li> </ul>
Grinding Wheel	<ul style="list-style-type: none"> <li>· SA80J7V75S72(Noritake)</li> <li>· 510X60X203.20</li> </ul>
Grinding Conditions	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Grinding Wheel Speed : 2700m/min</li> <li>· Feed rate: 0.1~0.15mm/min</li> </ul>



(A)



(B)

Fig. 5 AE & micro phone signals at contact point and frequency of micro phone

때 발생하는 AE 신호의 관계를 이용해 간접적방법으로 솟돌의 기준 손상깊이를 측정했다. 본 연구에서 대상으로 한 솟돌의 형상은 프런지 연삭을 위한 솟돌면(A면)과 단단이 있는 가공물의 축면을 가공하기 위한 솟돌면(B면)을 갖는다. 드레싱을 할 때 검출한 AE 신호 및 측정 데이터의 표준편차를 그림7 (A)-(E)에 나타내었다. (A)는 황삭의 경우, (B)는 중삭의 경우 정상 드레싱 신호이며, (C)의 경우는 비정상적인 연삭에 의해 첫번째 드레싱에서 A면이 심하게 손상된 예이다. 이 경우 두 번째 드레싱에서는 드레싱이 정상적으로 된 것을 알 수 있다. (D)의 경우는 B면 뒷부분이 (E)의 경우는 B면 앞부분이 손상된 예이다. 이러한 결과를 이용해 기준이 되는 정상 솟돌의 드레싱 AE 신호레벨 표준편차  $Std\_Dev(AE)_{ref}$ 와 측정된 솟돌에 대한 AE 신호레벨의 표준편차  $Std\_Dev(AE)_{meas}$ 의 편차  $r$ 과 솟돌의 손상깊이와의 관계를 그림8에 나타내었다.

$$r = (Std\_Dev(AE)_{ref} - Std\_Dev(AE)_{meas}) / Std\_Dev(AE)_{ref} (\%) \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 이용해 솟돌의 손상도 측정이 가능하며 이는 드레싱 기회에 대한 정보로 이용이 가능하다.

### 3.4 실험결과 및 고찰

이상의 연삭 실험에서 알 수 있듯이 연삭음은 공작물과 솟돌의 균접상태를, 심압대에 설치한 AE 센서는 공연삭, 공작물과 솟돌 사이의 접촉상태 그리고 솟돌의 손상상태를 검출하는 데 중요한 정보를 제공한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 경제성, 시스템 구성의 간소화를 위해, 연삭음 정보를 얻기 위해서는 초음파 센서 그리고 연삭력 정보를 얻기 위해서는 AE 센서를 이용한다.

연삭은 공연삭, 균접, 부분접촉, 완전접촉순으로 진행된다. 이러한 공정순서를 바탕으로 초음파 신호의 레벨이 공연삭 기준신호에 비해 30% 증가하면 균접으로 판단한다. 접촉은 AE 신호의 레벨이 공연삭 기준신호 레벨에 비해 30% 증가하면 접촉으로 판단 한다. 또한 AE 신호 레벨의 표준편차를 이용해 솟돌의 손상정도 크기 파악이 가능하다.

## 4. 감시 시스템

### 4.1 시스템 구성

본 연구에서 대상으로 한 원통 프런지 연삭공정에서의 공연삭시간 단축을 위한 공정감시 및 드레싱 신호를 이용한 솟돌상태 검출을 위한 시스템 구성은 그림9과 같다. 감시제어 시스템은 연삭의 상태신호를 얻기 위한 센서부, 검출된 신호를 이용해 상태를 판단하는 상태판단부 그리고 판단된 결과를 이용해 연삭기를 제어하기 위한 제어부로 구성했다. 상태판단부는 두개의 신호를 이용해 솟돌과 공작물의 공연삭, 균접, 접촉상태를 판단하는 연삭상태판단부와 AE 신호를 이용해 솟돌의 상태를 판단하는 솟돌상태판단부으로 구성되어 있다.

센서부에서는 검출된 신호를 증폭한 후 디지털화한다. 연삭상태판단부에서는 얻어진 신호 레벨을 이용해 균접, 접촉상태를 판단한다. 공연삭으로 판단될 때는 기준속도의 750% 그리고 균접으로 판단될 때는 적절히 이송속도를 감소시켜 접촉 직전에 100%가 되도록 이송속도 제어기(Feedrate Controller)를 통해 CNC 연삭기의 Override를 제어한다. 정상적인 연삭이 진행되는 경우에는 균접에서 이

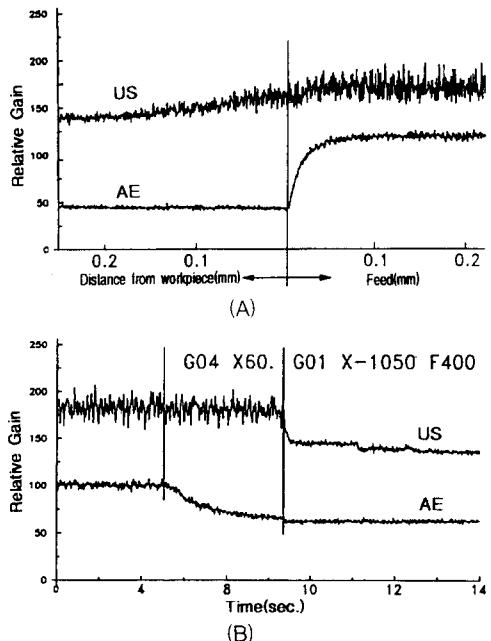


Fig. 6 Change of AE and ultrasonic signal at contact point and spark out

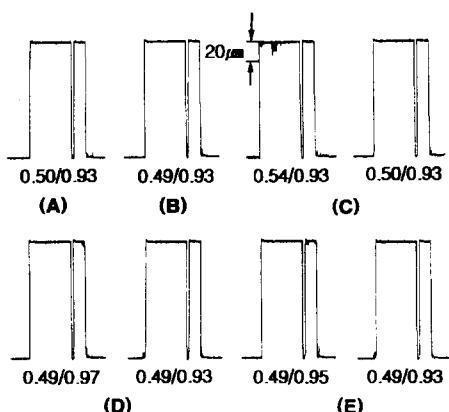


Fig. 7 Dressing AE signals and standard deviation

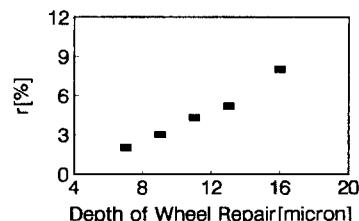


Fig. 8 Relationship between  $r$  and depth of wheel repair

속도가 감소하여 접촉점에서 정상 연삭속도에 도달되기 때문에 AE에 의한 접촉점 검출이 의미가 적지만 비정상적인 열처리변형에 의해 비정상적으로 접촉이 이루어지는 경우는 AE에 의한 접촉상태 검출 및 이송속도제어가 필요하다.

연삭공정은 솟돌의 조직상태, 공작물의 조직 및 열처리상태에 따라 동일한 연삭공정을 거쳐도 동일한 연삭속도 형상이 형성되지 않는 경우가 많다. 따라서 솟돌상태판단부에서는 드레싱시 발생하는 AE 신호의 표준편차를 이용해 솟돌의 손상깊이에 대한 정보를 제공한다.

## 4.2 감시/제어 결과

구성된 시스템의 성능을 확인하기 위해 개발된 시스템을 이용해 연삭실험을 수행했다. 가공물은 직경 45mm의 S45C를 이용했으며 기준 이송속도는 0.1mm/min.으로 하였다. 이에 대한 결과를 그림10에 나타내었다. 그림10 a)는 종래의 방법에 의해 가공했을 때의 신호 모습이다. AE 신호가 초음파 보다 50초 정도 늦게 반응함을 알 수 있다. b)는 본 연구에서 개발한 감시/제어 시스템을 이용한 연삭 신호 모습이다. 초음파 신호가 발생되고 약 10초 후 AE 신호가 검출됨을 알 수 있다. 이는 a)에서 나타난 근접간격을 고려하여 공연삭시에는 750%의 Override로, 근접이 검출된 후에는 10msec 간격을 두고 50%씩 속도를 줄여 접촉전에 100%로 제어되었다. 그 결과 종래의 방법에 비해 44초 정도의 비가공시간 단축 효과가 있었음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 원통 프レン지 연삭에서 비가공시간을 줄이기 위해 공연삭시간 단축과 드레싱 신호를 이용한 솟돌 손상상태 검출에 관한 연구를 수행했다. 원통 프렌지 연삭을 대상으로 연삭기의 심압대에 설치한 AE센서와 솟돌 덮개에 설치한 초음파센서를 이용해 공연삭, 공작물과 솟돌의 근접, 접촉상태를 감시하고 이에 대응해 적절히 이송속도를 제어함으로서 비가공시간을 단축하고, 드레싱시 나타나는 AE 신호를 이용해 솟돌의 손상상태를 검출해서 드레싱에 횟수에 대한 효과적인 정보를 제공하는 시스템을 개발했다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연삭시 발생하는 연삭음을 이용해 공작물과 솟돌의 근접상태 검출이 가능했으며, AE 신호를 이용해 접촉상태 검출이 가능했다.
- 2) 드레싱시 발생하는 AE 신호의 표준편차를 이용해 솟돌의 손상크기 검출이 가능했다.
- 3) 이상과 같은 결과를 바탕으로 원통 연삭 비가공시간 단축 시스템을 개발 했다.

## 참고문헌

- [1] 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
- [2] 堀野義昭, 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號, 1982
- [3] 金善浩, 安重桓, 宮澤伸一, “砥石・工作物の接觸状態検出による円筒研削工程の監視・制御”, 1995年度精密工學會秋季大會學術講演會論文集, pp.163-164, 1995
- [4] Inasaki, I., “Monitoring and Optimization of Internal

- Grinding Process”, Annals of the CIRP Vol.40, 1991  
[5] Inasaki, I., “Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals”, Annals of the CIRP Vol.34, 1985  
[6] 박희곤, “원통연삭기의 공연삭 시간단축 및 충돌방지에 관한 고찰”, 공작기계, pp.39-45, 95. 3  
[7] D. Dornfeld, He Gao Cai, An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission”, Transactions of the ASME, Vol. 106, 1984  
[8] Schumack, M. R., “Analysis of Fluid Flow Under a Grinding Wheel”, Transactions of the ASME, Vol. 113, 1984

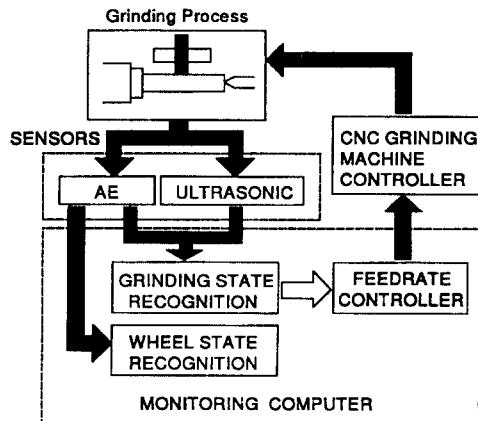


Fig. 9 Schematics of monitoring and control system

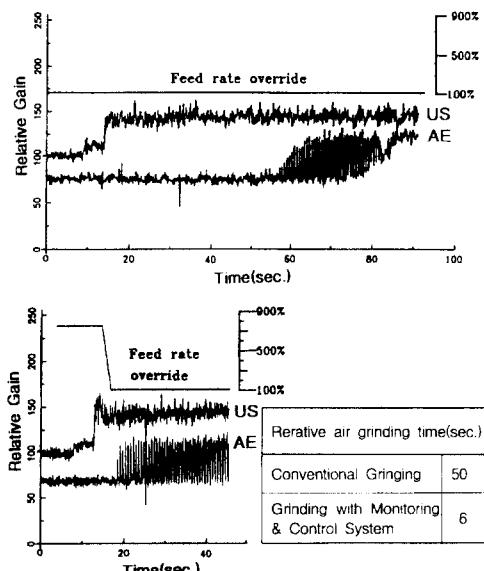


Fig. 10 Experimental result by conventional grinding and using monitoring and control system