

AE 감시 장치를 이용한 센터리스 연삭 공정의 감시

김성렬*, 김화영*, 김선호**, 안중환*

Process Monitoring of Centerless Grinding Using an AE Monitoring Unit

Sung-Ryul Kim*, Hwa-Young Kim*, Sun-Ho Kim**, Jung-Hwan Ahn*

ABSTRACT

Since grinding is a more complicated process than any other machining process, it is hard for operators to setup a grinding machine properly and to find out correctly abnormal grinding states resulting in damages to products. Abnormalities would be caused by improper setup, improper dressing/grinding conditions which are likely to be occurred without skilled operators' attention.

In this study, an AE monitoring unit is developed to help operators conduct with ease setup, and set properly dressing/grinding conditions. AErms(root-mean-square) signal being monitored, on-going process states during grinding and dressing is visualized for machine operators to judge whether the processes are in good condition. Evaluation tests are carried out on centerless grinding machines-both cylindrical and internal. The developed AE monitoring system is verified to be useful to check grinding/dressing states in process even in the centerless grinding of which process is most unknown among various grinding methods because of the complex structure.

Key Words : Acoustic Emission (AE : 음향 방출), AE monitoring system (AE 감시 장치), Grinding states monitoring (연삭상태 감시), Centerless grinding (센터리스 연삭), Dressing process (드레싱 공정)

1. 서론

연삭가공은 전통적 가공법이지만 오늘날에도 정밀가공에 가장 널리 사용되는 가공 방법중 하나로서, 난삭재 또는 열처리를 거친 경한 재료의 정밀가공에는 주요한 가공방법중의 하나이다. 특히, 연삭가공은 가공의 특성상 숙련된 작업자의 경험에 크게 의존하는데, 최근의 숙련공 부족 현상으로 인해 생산성 저하 뿐 아니라 가공품의 불균일로 인해 제품의 표준화에 어려움을 겪고 있으며, 이로 인해 연삭 공정의 자동화, 무인화에 대한 요구가 점차

커지고 있다.

연삭가공중 작업자의 중요 임무는 정확한 기계 세팅, 적절한 드레싱 시점 결정에 의한 드레싱 작업, 가공중 이상상태 감시 및 이상상태 발생시 신속한 후처리, 작업중 연삭조건에 적절한 제어 등이며 작업자는 자신의 감각 기관으로부터 들어오는 신호와 자신의 경험과 지식을 기초로 하여 판단하고 행동하게 된다⁽¹⁾. 따라서 무인 자동화 연삭공정을 위해서는 작업자의 감시·제어 임무를 대신해서 수행할 수 있는 감시 시스템의 개발이 필요하다.

연삭공정의 감시·제어에 대한 연구는 다른 가

* 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

** 한국기계연구원 자동화연구부

공 방법에 비해 늦은 편인데, 이는 연삭공정이 제품의 면품위(치수 정도 및 표면 정도)를 결정하는 최종 공정이기 때문에 높은 가공 신뢰성이 요구되며, 또한, 고려해야 할 가공 파라미터(연삭수들, 드레싱 조건, 연삭기 등)들이 많기 때문에 신뢰성 있는 감시 기술의 개발이 어렵기 때문이다. 하지만 최근 들어 다양한 센서 기술의 발달과 퍼지추론, 신경회로망, 유전자 알고리즘과 같은 인공 지능적인 기법을 진단 알고리즘으로 사용함으로써 감시의 신뢰성을 높일 수 있게 됨에 따라 연삭가공의 감시·제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 편이다⁽²⁻⁴⁾.

연삭가공 감시에 주로 사용되는 센서 신호로는 연삭저항⁽⁵⁾, 진동⁽⁶⁾, 초음파⁽⁷⁾, AE⁽⁸⁻¹¹⁾ 등이 있으며, 이들 신호를 이용한 연삭공정 감시에 대한 연구 결과가 몇몇 연구자들에 의해 발표되었다. 특히 AE 센서가 연삭상태 감시에 많이 쓰이는데 이는 AE 신호가 주변 잡음에 비해 아주 높은 주파수 대역을 가지기 때문에 잡음 제거가 용이하므로 감시의 신뢰성을 높일 수 있기 때문이다. Dornfeld⁽¹²⁾가 AE 신호의 RMS(Root Mean Square)값을 이용한 연삭상태 감시에 대한 가능성을 소개한 이후, AE 신호는 여러 연구자들에 의해 연삭공정 감시뿐 아니라 드레싱 상태 감시⁽⁹⁾, 공연삭시간 단축^(7,10) 등 다양한 목적으로 이용되어져 왔다. 또한 J. Webster⁽¹³⁾는 연삭공정시 AE 원신호(raw signal)의 특성 및 이를 이용한 연삭상태 감시에 대한 연구도 수행하였다.

한편, AE 신호를 이용한 연삭상태 감시의 큰 문제점은 센서의 부착위치에 따른 AE 신호의 감도 변화이다. AE 신호는 고주파 신호이기 때문에 가공점에서 멀어지면 신호의 감쇠가 크기 때문에 가능한 한 가공점과 가까운 위치에 부착해야하는 단점을 갖고 있다. 그래서 Inasaki⁽¹⁴⁾는 AE 센서를 내장한 CBN 스톨을 이용하여 연삭중 검출된 AE 신호의 신뢰성을 높이는 연구도 수행한바 있다.

본 연구에서는 작업자의 청각이나 시각에 의존하던 연삭공정상태의 감시를, 작업자가 작업상태의 직접 관찰을 통해 기계를 짧은 시간에 최적으로 셋팅할 수 있게 하고, 가공중 연삭상태에 대한 정보를 제공하기 위한 연구를 수행했다. AE 신호특성이 고려된 감시장치를 개발하고, 개발된 장치의 성능을 평가하기 위해, 금형의 코아, 베어링, 모터축과 같은 정밀부품 가공에 널리 사용되는 센터리

스 연삭공정에 적용하고 실험을 수행했다. 본 연구에서 개발한 AE 감시 장치는 레벨 또는 계인의 조정을 통해 다른 가공공정-밀링, 선삭, 드릴링, 연삭-에 적용할 수 있도록 설계되었다.

2. AE 감시 장치

2.1 AE 감시 장치의 구성

Fig.1은 구성된 AE 감시 장치의 신호처리 과정을 나타낸다. AE 감시 장치는 크게 센서 신호를 받아들이는 입력부, 증폭 및 필터링, AE_{rms}값을 구하는 신호처리부, 신호처리 결과를 나타내는 출력부로 구성되어 있다.

입력부는 두 개의 입력단자를 가지고 있으며 하나는 장치 내부의 증폭기를 이용하여 신호를 증폭시키는 경우 사용하는 단자이며, 또 하나는 내부 증폭기를 쓰지 않고 외부에서 신호를 직접 증폭시킨 신호를 입력받는 단자이다. 이와 같이 설계한 이유는 연삭가공의 경우 작업조건 및 센서의 부착 위치에 따라 신호의 출력레벨이 매우 큰 차이가 있으므로 내부 증폭기로 처리할 수 없는 경우에는 외부에서 먼저 증폭시킨 후 증폭된 신호를 입력받을 수 있도록 하기 위함이다.

신호처리부는 버퍼회로, 증폭회로, 고주파 대역통과 필터(High Pass Filter: HPF)회로, RMS-DC

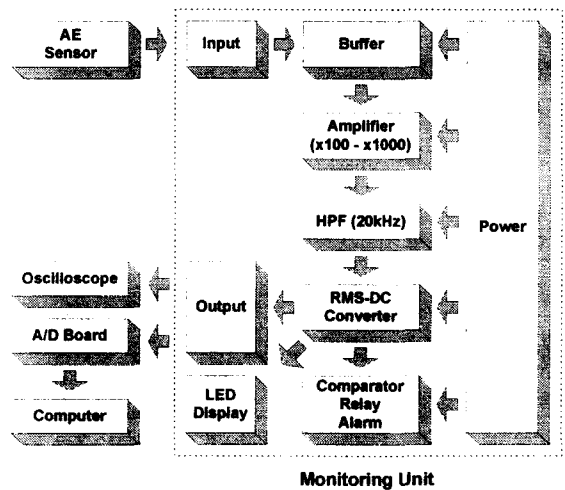
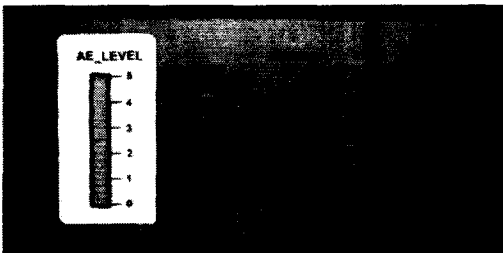


Fig. 1 Signal processing of AE monitoring unit

변환 회로로 구성되어 있다. 일반적으로 AE 센서에서 나오는 신호는 고임피던스이며 아주 미약한 전류가 검출되므로 신호손실과 케이블을 통한 노이즈를 최소화시키기 위해서는 고임피던스를 저임피던스로 바꾸고 적당한 크기로 신호를 증폭시켜 주어야 한다. 버퍼 회로(OP Amp. CA3140)는 센서로부터 입력된 고임피던스 신호를 저임피던스로 바꾸는 역할을 하며 증폭 회로(OP Amp. LM 318)는 2단 증폭을 사용하여 수mV ~ 수십mV의 고주파 AE 신호를 수백 배에서 수천 배로 증폭시킨다. 신호처리시 관심 있는 AE 신호는 100kHz 이상의 고주파 성분이기 때문에 고주파 대역통과 필터(OP Amp. LF356)를 통해 불필요한 저주파 잡음 성분을 제거시킨다. 이런 저주파 잡음 신호는 주로 10kHz 이하의 주파수 대역을 갖는 신호이므로 잡음 제거를 위한 차단 주파수를 20kHz로 설정하였다. 필터링된 신호는 RMS-DC 변환기(AD 536)를 통해 AE 파형을 전파 정류한 후 RMS 값으로 출력되며, 그 출력 값은 레벨 미터로 표시된다. 또한 부하의 변동과 관계없이 일정한 전압을 부하에 공급하기 위해, 제너다이오드를 사용하여 미소한 신호를 취급하는 전자 회로가



(a) Front



(b) Rear

Fig. 2 Photograph of the developed AE monitoring unit

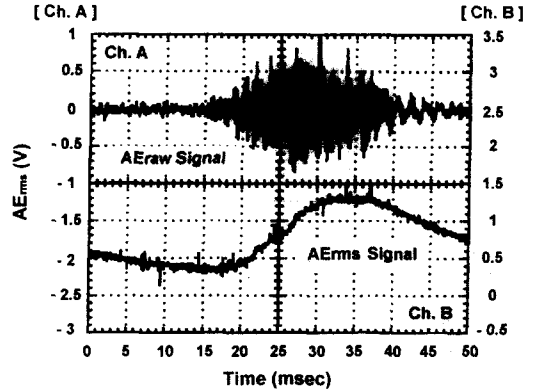


Fig. 3 Comparison of AE_{raw} signal and AE_{rms} signal

안정하게 동작하도록 하였다.

출력부는 검출된 AE_{rms} 신호를 오실로스코프에 연결하여 작업자로 하여금 가공 상태 진단하는데 도움을 주거나 또는 AD 변환기를 이용하여 컴퓨터로 데이터를 보내 컴퓨터 내의 진단 시스템에서 연삭 가공 상태를 진단할 수 있도록 하였다. Fig.2는 본 연구에서 개발한 AE 감시 장치의 사진이다.

2.2 AE_{rms} 신호의 평가

AE란 고체 재료가 소성변형이나 파괴될 때 발생하는 탄성에너지가 음파로 고체를 통해 전송되는 파를 말한다. 연삭가공시 AE 신호는 슛돌입자와 공작물사이의 가공에 의해 발생하며 가공부하의 크기에 따라 발생하는 AE파의 크기가 달라지는데, 일반적으로 이송당 가공면적이 크거나 슛돌의 눈막힘 등으로 인해 가공부하가 커지면 AE 신호도 커지는 것으로 알려져 있다. 발생하는 AE 신호의 크기는 RMS값을 이용하여 나타낼 수 있으며 AE_{rms} 는 식(1)과 같이 구한다.

$$AE_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} AE_{raw}^2(t) dt} \quad (1)$$

여기서 $AE_{raw}(t)$ 는 AE 원신호를 나타내며 ΔT 는 RMS값을 취하는 평균시간을 나타낸다.

Fig. 3은 개발한 AE 감시 장치를 이용하여 얻은 AE_{rms} 신호와 증폭한 AE_{raw} 신호를 비교한 것이다. AE_{raw} 신호와 AE_{rms} 신호 사이에 약간의 시간지연이 생기는데, 이는 RMS-DC 회로에 설정된 평균시간 때

Table 1 Grinding conditions for experiments

Grinding Type Conditions	Centerless Cylindrical Grinding	Centerless Internal Grinding
	Grinding Machine	KC-300W (made by NIPPEL Co.)
Workpiece	SM45C (H _R C 60) (ϕ 16×110mm)	SM45C (H _R C 60) (ϕ 30×42mm)
Grinding Wheel	EA80K7V75S (ϕ 610×W110mm)	32A80M6VBE (ϕ 20×W6mm)
Wheel Speed (m/min)	2400	2512
Regulating Wheel/ Roller Speed (rpm)	27	150
Dressing Depth (μ m)	1st stroke : 50 2nd stroke : 50 3rd stroke : 20 4th stroke : 50	

문에 생기는 현상으로 RMS 회로 설계시 설정값에 따라 달라진다. 본 감시 장치에서는 RMS 값을 구하기 위한 평균시간을 약 10msec 정도로 하였으며, 이는 연삭작업을 실시간 감시하는데는 문제가 발생하지 않는다.

3. 실험장치 및 방법

Table 1은 실험에 사용된 연삭조건을 나타낸다. 평가 실험은 플런지형 센터리스 원통 연삭기(plunge type centerless cylindrical grinding machine)와 센터리스 내면 연삭기(centerless internal grinding machine)에서 수행하였다. Fig. 4는 센터리스 원통 연삭에서의 실험장치도이며, Fig. 5는 센터리스 내면 연삭에서의 실험장치도를 나타낸다. AE 센서는 전하 증폭기를 내장하고 있는 압전소자형 AE 센서(NANO 30)를 사용하였다. AE 신호의 경우 센서의 부착위치에 따라 신호의 감도가 현저히 차이가 나므로 가능한 한 가공점과 가까운 위치에 부착하는게 좋다. 이를 위해 본 연구에서는 센터리스 연삭에서 공작물을 받쳐 주는 역할을 하는 가이드 블레이드에 부착하였다. 가공중 검출된 AE 신호는 AE 감시 장치를 통해 증폭, 필터링을 거쳐 RMS값으로 바뀐 후 출력단으로 출력되며 이를 컴퓨터나 오실로스코프로 연결하여 가공상태를 진단하였다.

4. 실험결과 및 고찰

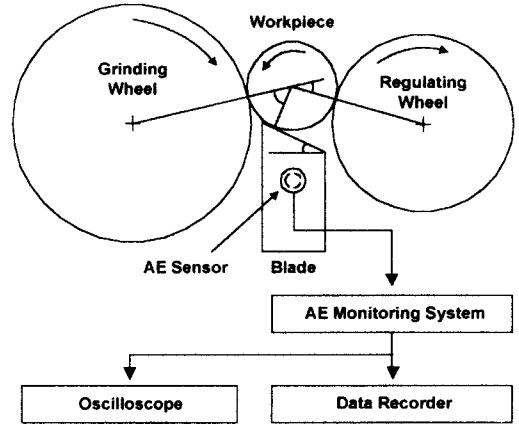


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup in centerless cylindrical grinding

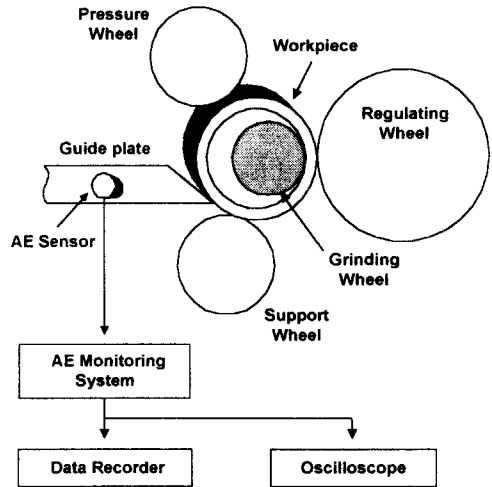


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup in centerless internal grinding

4.1 센터리스 원통 연삭가공 상태 감시

Fig. 6은 센터리스 원통 연삭으로 가공할 시편과 그때의 연삭숫돌 형상을 나타낸다. 시편은 a, b, c로 표현한 3개의 단이 있는 베어링 축으로 주로 이런 부품들은 플런지형 센터리스 원통 연삭으로 가공한다. Fig. 7은 센터리스 원통 연삭가공으로 이 시편을 가공할 때 AE 감시 장치로 검출한 AE_{rms} 신호를 나타낸다. 연삭시간을 연삭숫돌과 공작물이 접촉한 시점에서 한 개의 공작물의 가공이 끝날 때까지의 전시간을 14초(황삭 가공 8초, 정삭

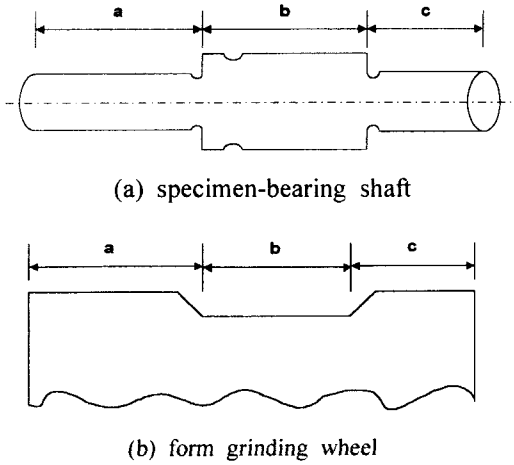
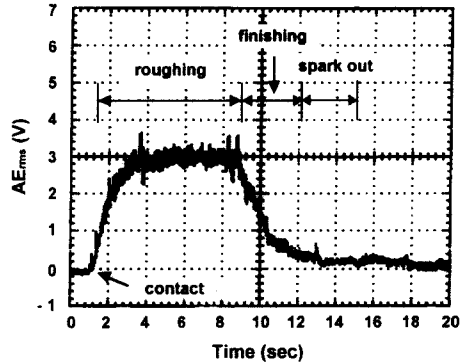


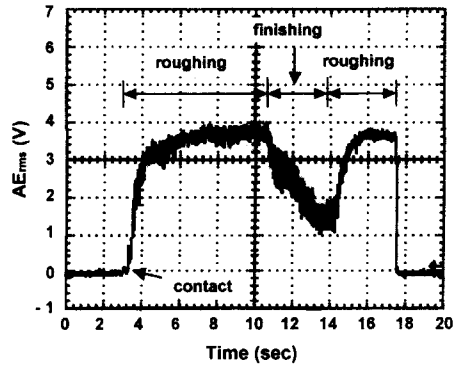
Fig. 6 Shape of the specimen and grinding wheel

가공 3초, 스파크 아웃 시간 3초)로 설정한 후 연삭가공을 수행하였다. Fig. 7(a)은 연삭가공이 정상적으로 이루어졌을 때 얻어진 AE_{rms} 신호로 미리 설정한 연삭가공 시간에 따라 황삭, 정삭, 스파크 아웃 단계가 제대로 진행됨을 알 수 있다. 연삭 슷돌과 공작물의 접촉 후 약 1초간 슷돌이 일정한 절입깊이까지 도달하는 동안 AE_{rms} 신호는 증가하며 일정한 절입깊이에 도달한 후에는 거의 일정하게 유지함을 알 수 있다. 또한 정삭단계에서 절입깊이가 감소되면 AE_{rms} 값도 따라서 감소하고 스파크 아웃 단계로 들어가면 절입이 없으므로 슷돌의 탄성 회복에 의한 연삭력에 의해 약간의 AE_{rms} 신호가 나타난다. 이 결과는 AE_{rms} 신호가 연삭 저항의 변화에 민감하며 부하의 크기에 비례해서 커진다는 이전의 연구결과들과 일치함을 보여준다.

Fig. 7(b)은 이상상태 발생시 얻은 AE 신호이다. Fig. 7(a)과 동일한 조건에서 작업을 수행하였으나 황삭, 정삭단계 후 스파크 아웃 단계에서 다시 황삭 가공이 일어남을 AE_{rms} 신호로부터 알 수 있다. 이는 센터리스 연삭가공에서 공작물의 셋업시 설정 파라미터중 하나인 공작물 센터 높이각 (center height angle : β)의 설정이 잘못되어서 생긴 결과이다. Fig. 8은 센터리스 원통 연삭시 공작물과 슷돌 사이의 기하학적 셋업 형상을 나타낸다. 센터리스 연삭의 경우 가공 정도는 지지 블레이드 각 (support blade angle : α)과 공작물 센터 높이각 (center height angle : β)과 같은 셋업 파



(a) Normal



(b) Abnormal

Fig. 7 AE_{rms} signal in centerless cylindrical grinding process

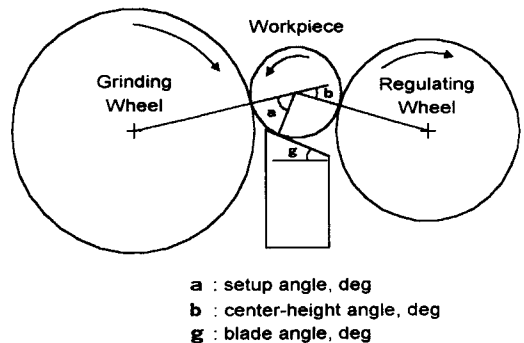


Fig. 8 Geometric setup configuration in centerless cylindrical grinding

라미터의 적절한 선택에 크게 좌우된다^(15, 16). Fig. 7(b)의 경우 기계 셋업시 공작물 센터 높이각이 크게 설정된 채 가공됨으로 조정숫돌에 의해 상향마찰력이 공작물에 작용하게 되어 공작물 체결이 불안정해진 것이다. 이 경우는 조정 숫돌의 상향 마찰력에 의해 공작물이 블레이드 위에 안정되게 접촉하지 못하고 가공중 점프현상이 발생하게 되어 가공물의 진원도 및 표면정도가 나빠지게 된다. 스파크 아웃 단계에서의 황삭 가공이 일어나는 것은 이런 점프현상으로 인해 공작물의 덜 가공된 부분이 실제적으로 가공되기 때문이다. 따라서 작업전 미리 이러한 문제가 발생치 않도록 적절하게 설정 파라미터를 셋업 해야 한다. 작업전 설정 파라미터의 셋업은 전적으로 작업자의 손에 의존하고 있으며 여러번의 시행착오를 거친 후 적절한 값으로 설정하게 된다. 한편 작업중 이런 비정상 상태가 발생하면 작업자는 셋업을 다시 한 후 가공을 계속해야 하나 숙련된 작업자가 아니면 가공중 이런 현상을 찾기가 매우 어렵다. 하지만 본 연구에서 개발한 AE 감시 장치를 이용하면 작업자가 쉽게 셋팅 불량 발생을 진단할 수 있어 신속한 후처리가 가능하다. 또한 이 경우 가공중 공작물의 점프 현상으로 인하여 황삭 및 정삭가공중에 AE_{rms} 의 크기와 변동이 정상상태때보다 크게 나타나는데 이것을 이용하면 가공상태 불안정에 대한 정보를 스파크 아웃 단계 전에 미리 알 수 있다. Fig.7(b)에서 약 17.5초에서 AE 신호가 급격히 떨어지는 것은 미리 설정된 14초 시간뒤 조정숫돌이 뒤로 후퇴함으로 연삭이 일어나지 않기 때문이다.

4.2 센터리스 내면 연삭가공 상태 감시

Fig. 9는 센터리스 내면연삭기로 베어링을 연삭가공할 때 검출한 AE_{rms} 신호이다. Fig. 9(a)는 정상상태에서 검출된 신호이며, Fig. 9(b)는 이상 상태에서 검출된 AE_{rms} 신호이다. Fig. 9(a)는 황삭에서의 절입속도를 0.12 mm/min, 정삭에서의 절입속도를 0.06 mm/min으로 설정한 후 가공했을 때의 결과로 연삭저항이 크지 않으므로 안정된 상태에서 가공이 진행됨을 보여준다. 그러나 Fig. 9(b)의 경우, 황삭 절입속도 0.24 mm/min, 정삭 절입속도 0.03 mm/min로 설정하고 작업을 수행하였으며, 감시 장치로 AE_{rms} 신호의 변화를 감시한 결과 황삭단계에서 AE_{rms} 의 변동이 심하게 나타나 이상상태가 발생했음을 알 수 있다. 이 경우는 작업전 황삭가

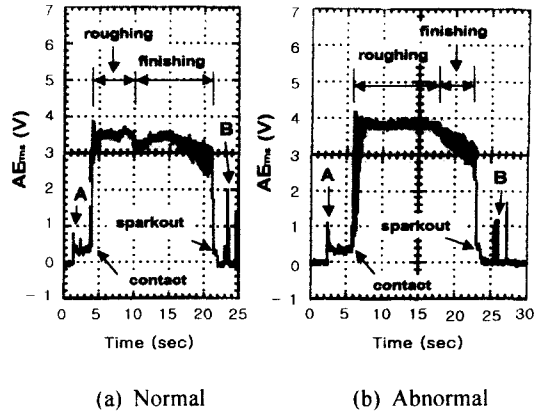


Fig. 9 AE_{rms} signals in centerless internal grinding process

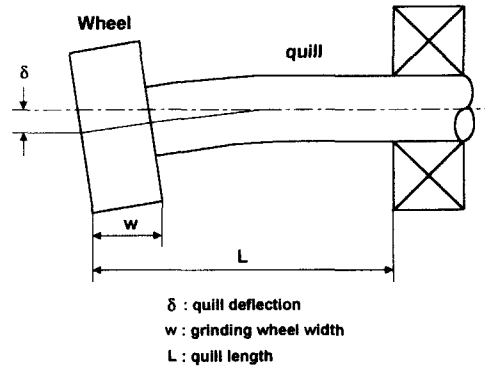


Fig. 10 Illustration of quill deflection

공 조건으로 설정한 절입속도가 너무 크게 설정하였기 때문에 일어났다. 절입속도가 커지면 연삭숫돌에 큰 연삭저항이 걸리게 되는데 내면 연삭용 숫돌의 경우 숫돌 축의 강성이 크지 않기 때문에 과도한 연삭저항으로 인해 Fig.10과 같이 축 휨이 발생하게 되고 이로 인하여 가공물이 경사진 상태로 가공이 이루어지게 된다. 또한 정삭단계에서 절입속도가 감소하면 축이 탄성회복을 일으켜 공작물의 경사진 부분이 서서히 가공됨을 보여준다. 이와 같은 상태로 가공을 행하면, 결국 공작물의 치수정도가 악화되므로 가공중 적절한 절입속도로 제어해야 한다. Fig. 9의 A, B지점에서 신호가 튀는 것은 이송기구에 의한 영향이며, A, B지점 사이의 신호가 연삭 한 사이클이다.

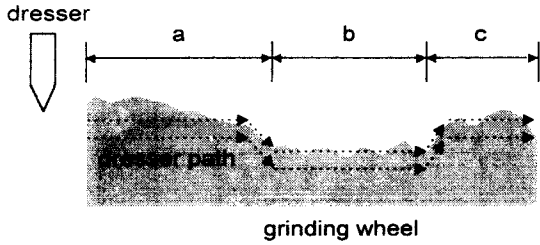


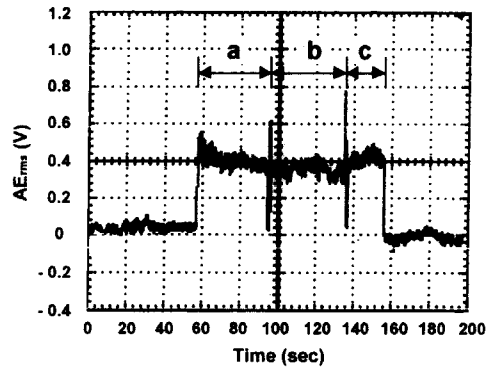
Fig. 11 Illustrative and dressing paths profile of a worn grinding wheel

4.3 드레싱 상태 감시

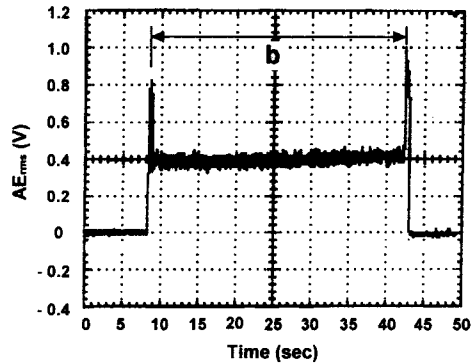
연삭공정에서 적절한 드레싱 시점 결정과 드레싱 절입량의 적절한 선택은 작업자의 중요한 임무 중 하나이다. 적절한 시기와 드레싱량의 설정은 연삭숫돌의 과도한 마멸을 막을 뿐 아니라 가공 시간의 단축에도 매우 중요하다. 드레싱 상태 감시의 경우, 본 연구에서는 드레서에 AE 센서를 설치하여 AE 신호를 검출하였다.

Fig. 11은 일정시간 연삭가공을 해서 마멸이 꽤 진행된 드레싱 직전의 숫돌의 표면형태와 드레서의 이동 경로를 보여주는 예이다. 드레싱할 때 드레서는 일정한 절입량으로 숫돌의 형상에 따라 움직이도록 설정하였다. 연삭과 더불어 숫돌이 일정하고 균일하게 마모되는게 아니라 편마모, 눈막힘 등에 의해 숫돌의 단면형상이 일정치 않게 되며, 이로 인해 가공면의 치수정도 및 표면정도가 나빠지게 된다. Fig. 12는 센터리스 연삭가공에서의 드레싱 공정시 검출된 AE_{rms} 신호이다. 편마모나 눈막힘이 생긴 숫돌을 드레싱 하면 실제의 드레싱 절입깊이는 숫돌 폭에 따라 일정하게 되지 않으며 좋은 가공면을 얻기 위해서는 숫돌 표면에서 요철형상이 없어질 때까지 드레싱 작업을 반복 수행하여야 한다. Fig. 12(a)는 드레싱 깊이를 $50\mu m$ 로 드레서가 경로를 따라 1회 드레싱 할 때 검출된 AE 신호이다. 숫돌의 편마모와 눈막힘으로 인해 생긴 실제 드레싱 절입깊이의 차이때문에 AE_{rms} 의 신호의 변화가 크다. 또한 숫돌의 단차부분에서 신호가 아주 높게 튀는데 이는 드레서가 단차부분을 지날 때 생기는 약간의 충격에 의해 생긴 것이다.

Fig. 12(b)는 $50\mu m$ 로 2회 드레싱한 후 $50\mu m$ 으로 3회째 드레싱할 때 검출된 AE_{rms} 신호의 일부이다. 이전의 2회의 드레싱에 의해 숫돌의 편마모 부분이 완전히 제거된 상태로 드레서가 숫돌전면에



(a) AE signal for 1st stroke



(b) AE signal for 4th stroke

Fig. 12 AE signals during dressing

걸쳐 균일하게 접촉함으로써 AE_{rms} 신호의 크기가 일정하게 유지되는 것을 보여준다.

결론 및 향후연구

본 연구에서는 연삭가공상태 및 드레싱 공정 감시 기능을 갖춘 연삭공정용 AE 감시 장치를 개발하였으며, 이를 센터리스 연삭공정에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. AE 감시 장치로부터 검출한 AE_{rms} 신호는 연삭공정 상태변화에 민감하며 접근, 황삭, 정삭, spark out, 후퇴로 진행되는 플런지 연삭공정을 신

호의 레벨변화로 잘 나타낸다.

2. AE_{rms} 신호 변화를 관찰함으로써 기계셋팅의 잘못, 연삭조건 선정 잘못으로 발생하는 이상상태를 즉시 검출할 수 있다.

3. 드레싱 공정시 AE_{rms} 레벨을 이용함으로써 최적 드레싱 상태를 유지할 수 있으며, 과도한 드레싱으로 인한 슷돌 마모를 줄일 수 있다.

향후, 연구과제로 개발된 AE 감시 장치내에 마이크로 컴퓨터를 내장시켜 컴퓨터와의 인터페이스를 통한 정보 전달 없이 독립적으로 감시 진단하는 지능형 AE 감시 장치를 개발할 계획이며, 모든 연삭공정에 범용적으로 이용할 수 있도록 감시 장치의 유연성과 신뢰성을 높이기 위한 연구도 수행할 계획이다.

참고문헌

1. W. Brian Rowe, I. Inasaki, S. Malkin, "Applications of Artificial Intelligence in Grinding," *Annals of the CIRP*, Vol.43, pp. 521-531, 1994.
2. M. Sakakura, I. Inasaki, "A Neural Network Approach to the Decision-Making Process for Grinding Operations," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, pp. 353-356, 1992.
3. I. Inasaki, "Intelligent Monitoring System for Grinding," *The 2nd International Abrasive Technology Conference*, pp. 1-19, 1995.
4. M. Sakakura, I. Inasaki, "Intelligent Data Base for Grinding Operations," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 379-382, 1993.
5. 中尾政之, 畑村洋太郎, "研削抵抗のモニタリングによる研削盤の知能化," *砥粒加工學會誌*, 38卷, 4号, pp. 11-13, 1994.
6. 森 和男, 笠島永吉, "エキスパートシステムを用いた圓筒研削振動インプロセス診断システム," *機械研究所續報*, 44卷, 6号, pp. 211-219, 1990.
7. 김선호, 정병철, 안중환, "원통 프런지 연삭공정의 감시/제어 시스템," *한국정밀공학회지*, 제12권, 제9호, pp. 66-73, 1995.
8. 稲崎 一郎, "AEによる研削現象のセンシング," *砥粒加工學會誌*, 38卷, 4号, pp. 183-186, 1994.
9. I. Inasaki, K. Okamura, "Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, pp. 277-280, 1985.
10. 江田 弘, 貴志浩三, 山田卓郎, 藤原章多彦, "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号, pp. 50-51, 1982.
11. 김선호, 박화영, "원통연삭에 있어 비가공시간 단축기술," *한국정밀공학회추계학술대회 논문집*, pp. 103-107, 1995
12. Dornfeld, D. and Cai, H. G., "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission," *Transactions of the ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 106, FEB., pp. 28-33, 1984.
13. J. Webster, W. P. Dong, R. Lindsay, "Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 45, pp. 335-340, 1996.
14. 和久田 學, 稲崎 一郎, 小川活二, 高原基彰, "AEセンサ内蔵 CBN ホイールによる研削 プロセスの監視," *日本精密工學會誌*, 59卷, 2号, pp. 97-102, 1993.
15. S. Steven Zhou, Joseph R. Gartner, Trevor D. Howes, "On the Relationship between Setup Parameters and Lobing Behavior in Centerless Grinding," *Annals of the CIRP*, Vol. 45, pp. 341-346, 1996.
16. S. Takasu, M. Masuda, "Heavy-Duty Centerless Grinding for Multi-Diameter Shafts," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, pp. 323-326, 1988.