

생산성 향상을 위한 연삭공정의 감시·제어 시스템 개발

Development of Monitoring/Control System for High Productive Grinding System

정명철*(고등기술연구원), 안중환(부산대학교), 이상우((주) 한화)

Abstract

Non-uniform minute deformation of a cylindrical workpiece resulted from the heat treatment process prior to the grinding makes it difficult to control the approaching feedrate of a grinding wheel to a workpiece optimally without on-site detection of the grinding states in the plunge grinding.

The 4-stage model of the plunge grinding process is proposed according to the state of contact between grinding wheel and workpiece : precontact, partial contact, entire contact and spark-out. Despite of being serious to the precision of workpiece finished, the duration of spark-out is determined empirically.

The purpose of this research is to develop a monitoring/control system for saving non-production time and setting the optimal spark-out time based on sensor information in the plunge grinding using AE and ultra sonic sensor.

1. 서론

최근 생산시스템은 종래의 소품종 단량생산의 형태에서 대량종 소량생산의 형태로 변환되고 있다. 대량종 소량생산에서 고생산성, 고정도의 실현을 위해서는 생산시스템의 감시·제어 기능이 필수적이며, 그에 대한 방편으로 NC 공작기계나 머시닝센터의 작업공정에 대해서는 절삭력의 변화를 AE, 진동, 전류 등을 이용한, 간접검출에 의한 방법들이 다양하게 연구되고 있다.

그러나 기계가공의 마무리공정에서 수십 μm 수준의 고정밀도를 필요로하는 연삭공정의 감시에 대한 연구는 아직 미흡한 수준이며, 특히 고정도를 요구하는 공작물은 열처리를 거친 후 연삭을 행하게 되는데, 이 경우 공작물의 열변형이 수반되어 연삭공정의 고정밀도화에 큰 장애가 되고 있어 연삭공정의 감시·제어 기능이 더욱 절실히 요구된다.

본 논문에서는 AE와 초음파센서를 이용하여 연삭공정의 상태를 감시하고 감시 신호에 근거하여 연삭공정의 단계별 이송속도와 가공시간을 조절함으로써 생산성과 정밀도를 향상시킬 수 있는 감시·제어 시스템을 연구하였다.

2. 플런지 연삭 공정의 모델링

2.1. 기하학적 모델링

플런지 연삭은 공정 중의 연삭수들의 이송속도와 공작물과의 간섭 여부에 따라 급속이송(quick feed:1), 공절삭(air cut:2), 거친연삭(rough grinding:3), 미세연삭(fine grinding:4), 스파크 아웃(spark out:5), 급속귀환(quick return:6)의 작업단계로 구분할 수 있으며, 다시 수들과 공작물의 간섭상태에 따라 예비접촉

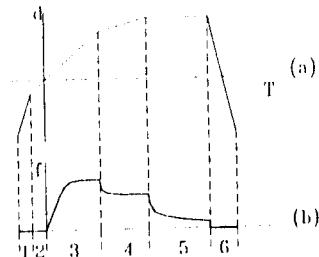


Fig. 1. Description of Grinding Process by infeed

(precontact), 부분접촉(partial - contact), 완전접촉(full - contact)으로 구분할 수 있다.

설정된 가공 개시점까지의 급속이송과 설정여유에 의한 공절삭이 존재하며 공작물과 연삭수들의 접촉이 이루어진 후 초기에는 연삭 수들의 탄성 변형에 의해 이송량과 생성되는 제품의 치수는 차이를 보인다. 수들의 이송이 마무리되었을 때 수들의 변형에 의한 치수오차가 존재하며, 이 수들의 변형에 의한 치수오차를 줄이기 위해 스파크아웃을 행하여 가공을 마무리하고 급속귀환하게 된다(Fig 1(a)).

2.2. 연삭력 모델링

공작물의 표면이 동일한 반경을 갖는 경우 Fig 2에서 보였듯이 수들과 공작물의 접촉이후 이송이 진행되면 반경방향의 연삭저항(F_n)이 작용하여 연삭 수들이 변형을 일으킨다. 이 상태는 이송량을 f , 이송속도를 V_f , 실질임 깊이를 a , 실질임 속도를 V_a , 공작

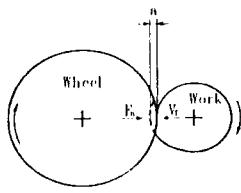


Fig. 2. Model of Plunge Grinding

물과 연삭 속도의 탄성에 의한 변형량을 δ 라 할 때 이송방향의 연삭지향을 $F_N = \alpha V_a$ 라 가정하면 (α 는 상수) $\delta = \frac{F_N}{k}$ 이므로 $V_a = V_f - \frac{\alpha}{k} \frac{dV_a}{dt}$ 이 되

어 접촉 개시점에서 부터 스파크아웃이 진행될 때까지의 실질입속도의 변화는 1차 저연계의 형태를 가지며 전체 공정을 고려해보면 Fig 1(b)와 같이 된다.

2.3. 공작물의 열변형

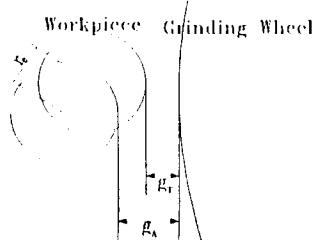


Fig. 3. Model of Deformed Workpiece

고경도의 봉재를 얻기 위해 열처리 과정을 거친 경우, 열처리를 거치면서 직경방향 보다 길이방향으로의 뒤틀림이 발생하여 실제의 봉재는 Fig 3에서 보였듯이 r_e 만큼 편심되어 있다고 볼 수 있으며, 이런 경우 급속이송 단계에서 공작물과 연삭 속도의 충돌을 피하기 위해 공작물과 속도와의 틈 g_A 를 충분히 크게 해야 한다. 이러한 틈이 생산성 저하의 원인이 된다.

3. 연삭상태 감시 실험

표 1에 제시된 조건으로 예비실험을 통해 작업의 진행에 따른 신호의 변화를 조사했다.

Table 1. Condition of Pretest

연삭기	TSUGAMI GAIN
연삭 속도	A80L8V
속도 속도	2700 m/min
절임 속도	0.1 mm/min
공작물 재질	SM45C(IIIC 10)
공작물 치수	직경 45mm, 길이 400mm

3.1. 실험 장치

본 연구에서 구성한 실험장치는 Fig 4와 같다. NC 연삭기의 심암축에 AE센서를 부착했으며 초음파 센서는 속도 덮개에 부착했다. 이 두 센서에서 나온

신호는 RMS로 변환하여 A/D 변환기를 이용 컴퓨터에 입력하고 컴퓨터에서 상태를 판단하여 feedrate override를 이용하여 연삭기 이송속도를 제어한다.

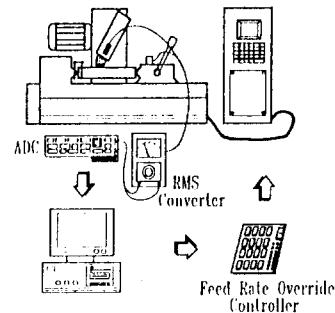


Fig. 4. System Configuration

3.2. 작업 상태에 따른 신호 변화

실험을 통해 AE 센서에서 검출된 AE파와 초음파 검출기에서 검출된 23kHz의 초음파를 이용하여 각 연삭 공정에 따른 신호의 특징을 조사해 보았다.

3.2.1. 작업 진행에 따른 AE 신호의 변화

표 1의 조건으로 0.05mm 이송시켰을 때의 AE 신호 변화의 모습을 Fig 5에 나타냈다. AE의 신호 레벨이 상승하기 시작하여 정점에 이를 때까지 6초 정도의 시간이 소요되며 절입 깊이의 변화에 따라 AE 신호의 레벨이 변하고 있다. 절입량의 변화와 공작물 반경의 감소량이 동일한 시점에서 레벨의 변화가 미소함을 알 수 있다. 또 퍼드 속도가 0이 되는 시점에서 AE 신호의 레벨이 감소하기 시작하며 스파크 아웃 상태로 들어간다. 스파크 아웃 상태로 들어가면 AE 신호의 레벨이 감소하기 시작하며 일정 시간이 지나면 공절삭 상태와 동일하게 유지된다.

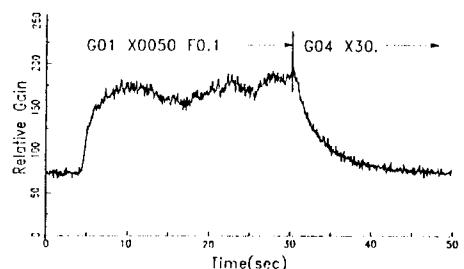


Fig. 5. Signal of AE RMS in Grinding Process

3.2.2. 작업 진행에 따른 초음파 검출기 신호의 변화

동일한 조건의 예비 실험에서 초음파 검출기에 의한 신호 변화의 모습은 Fig 6에 나타냈다. 초음파 검출기의 신호 역시 AE 신호와 유사하게 진행되나 연삭력의 변화에 따라 민감하게 변화하지 않음을 알 수 있다.

3.2.3. 접촉 개시점 검출

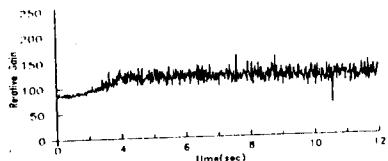


Fig. 6. Signal of Ultra Sonic in Grinding Process

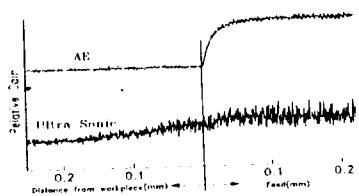


Fig. 7. AE & Ultra Sonic Signal in Contact point

Fig 7에서 보였듯이 초음파 검출기의 신호는 AE의 신호보다 먼저 반응하고 있음을 알 수 있다. 이는 공작물과 연삭 속들의 간격이 좁아짐에 따라 그 틈을 흐르는 연삭액의 유속이 빨라지므로 나타난 신호로 여겨진다. 연삭액에 의해 작업 전의 상태에서도 레벨이 어느정도 상승되어 있으며 AE 신호가 상승을 시작하기 6초 전에 초음파 검출기의 신호가 미리 상승되고 있음을 확인할 수 있다.

또 Fig 8은 스파크 아웃 단계에서의 AE와 초음파 검출기의 신호를 나타낸 것이다. 연삭이 스파크 아웃

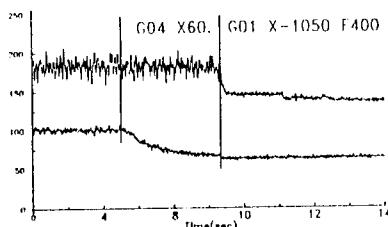


Fig. 8. AE & Ultra Sonic Signal in Spark-out

상태로 들어갈 때에 AE 신호가 감소되기 시작하고 공작물과 속들이 떨어지는 것과 동시에 초음파의 레벨이 감소한것을 알 수 있다. 속들이 공작물에서 멀어짐에 따라 초음파의 레벨이 약간 더 감소함을 알 수 있다.

3.2.4. 연삭 공정의 부하 상태 검출

연삭 공정 중의 부하의 변동에 따른 신호의 변화를 보기위해 절입 속도를 2단계로 바꾸어 가며 기록한 AE 신호와 초음파 신호의 변화를 Fig 9와 Fig 10에 나타내었다.

Fig 9에서는 정상 절삭 상태에서 AE 신호의 레벨이 절입 속도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. Fig 10을 통해서도 초음파 검출기의 신호 레벨이 AE 신호의 특성과 비슷하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

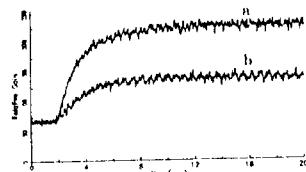


Fig. 9. AE Signal in Change of infeed rate
a : Feed 속도 0.5mm/min
b : Feed 속도 0.25mm/min

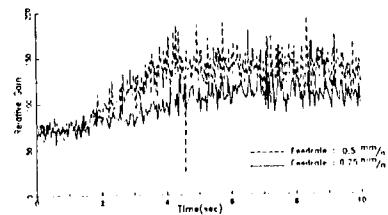


Fig. 10. Ultra Sonic Signal in Change of infeed rate

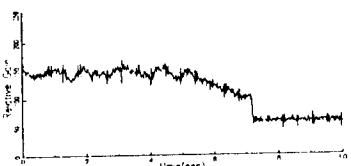


Fig. 11. AE Signal(Spark-out : 2sec)



Fig. 12. AE Signal(Spark-out : 5sec)



Fig. 13. AE Signal(Spark-out : 8sec)

Table 2. Change of Workpiece Diameter with Spark-out time

시간(초)	공작물 직경(mm)
2	41.647
5	41.630
8	41.624

또 AE 신호에서는 동일한 절임 속도에서 작업이 진행됨에 따라 처음 과도상태를 거친 후의 신호가 그 레벨이 처음보다는 조금 낮은 레벨을 유지함을 알 수 있다.

연삭공정 중 발생하는 AE파는 연삭 작업시 절임 속도가 변함에 따라 증가함을 알 수 있다.

3.2.5. 스파크 아웃 지속시간과 제품의 치수

Fig 11, Fig 12, Fig 13은 동일 재질의 공작물에 대해 스파크 아웃 시간을 2초, 5초, 8초 동안 지속하였을 때 AE의 변화를 보인 것이다. 스파크 아웃의 지속 시간에 따른 AE의 레벨이 차이가 남을 알 수 있다. 또 표 2는 그때의 제품의 치수를 측정한 결과이다.

4. 연삭 공정의 감시·제어

미리 학습된 신경회로망을 이용하여 진행중인 연삭 공정에 대한 상태(공절삭, 부분접촉, 완전접촉)를 판정하고 그 판정에 따른 제어를 수행했다.

Fig 14는 신경회로망을 이용해서 상태를 판단하고 제어를 수행했을 때의 모습이다. 초음파 검출기에서 신호가 검출된 후 약 10초 경과시 AE에서 신호가 검출됨을 알 수 있다. 0.08mm 정도의 간격을 고려하여 feedrate를 750% 즉 0.75mm/min에서 10ms의 간격을 두고 0.05mm/min씩 속도를 줄여 정상 가공 속도인 0.1mm/min로 조정되었다. 초음파 검출기의 신호는 반응 초기에 빠른 피드 속도로 인해 정상적인 피드 속도일 때 보다 약간 높음을 알 수 있다.

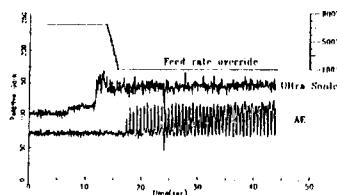


Fig. 14. Controlled Process Using
Neural Net
(Infeed rae : 0.1mm/min)

표 3에서는 신경회로망을 이용하여 연삭공정의 감시·제어를 수행했을 경우 작업 공정의 소요시간과 기존의 NC에 의한 작업시 소요시간을 나타냈다. 기존의 NC에 의한 작업 소요시간은 항상 일정하지만 신경회로망을 이용하여 연삭공정의 감시·제어를 수행했을 경우는 공작물의 변형 상태에 따라 가공시간이 달라진다.

Table 3. Comparision Time

기존의 방법에 의한 가공	37분 6초
Feed rate override를 이용하여 이송 속도를 제어한 가공	15분 47초
	17분

5. 결론

본 연구에서는 NC 연삭기에 부착한 AE, 초음파 검출기의 신호를 이용해 연삭공정의 종류를 판별하고 각 상태에 대해 이송속도를 조정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) AE의 RMS값은 연삭저항, 이송속도, 공작물 경도와 직접적인 관련이 있으며 AE 신호를 사용하여 공작물과 속들의 접촉 개시점을 검출할 수 있었다.
- 2) 초음파 검출기의 신호를 이용하여 공작물과 연삭 속들의 접촉 개시전의 상태를 검출할 수 있었으며 초음파 검출기의 신호는 연삭저항에 민감하지 않았다.
- 3) AE 신호를 이용하여 제품의 요구 정도를 만족시키며 cycle time을 줄일 수 있도록 spark-out 시간을 줄였다.
- 4) 연삭 상태의 감시 결과에 따라 feedrate를 급속이송, 근접이송, 연삭이송으로 override시킴으로써 cycle time을 줄였다.

6. 참고문헌

1. D. Dornfeld, He Gao Cai, An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission, Transactions of the ASME, Vol.106, 1984.
2. I. Inasaki, Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process, Annals of the CIRP Vol.40, 1991.
3. S. Spiewak, A Predictive Monitoring and Diagnosis System for Manufacturing, Annals of the CIRP Vol.40, 1989.
4. 米田孝夫, 研削加工における知能化, 機械の研究, 제44권 10호, 1992.