

연삭 공정의 연속 진단을 위한 모니터링에 관한 연구

강재훈*

A Study on the Monitoring Technology for the Continuous Detection of Grinding Process

Jae-Hoon Kang*

Abstract

Recently, manufacturing work has been transformed to small scale production form with various types to act up to user's expectation from mass production with a little items required in the past. Then FMS using NC type machineries has been applied actively also in domestic manufacturing line to meet thus tendency, but there are many machining troubles occurred during work process not be settled yet. Nowadays high efficiency has been required no less than high precision in grinding work for the improvement of productivity.

In this study, to represent more advanced FMS can be adapted to thus situation In-process type monitoring method using AE and Current sensors is suggested to investigate the machining condition in grinding process. As results from this experimental study, it is recognized well that grinding conditions and dressing point of in time can be estimated effectively using monitoring method suggested. Furthermore, surface shape of grinding wheel on voluntary point of in time can be predicted indirectly through the observation and comparison of AE signal waveform obtained as performance of continuous dressing work.

Keywords : Grinding Wheel Condition(연삭 슯돌 상태), AE Signal(음향 방출 신호), Current Signal Sensor(전류 센서), Monitoring Technology(감시 기술), Wear(마멸), Loading(눈막힘), Self-Generation(자생작용), Surface Roughness(표면 거칠기)

* 한국기계연구원 자동화연구부

1. 서론

유연성있는 생산 시스템을 갖추기 위하여 NC 공작기계를 활용하지만, 높은 가공 재현성을 얻을 수 있다는 장점 이외에, 공작물 재질의 불균일성, 공구 마멸 및 파손 등의 돌발 사태에 대하여 적절히 대처할 수 없다는 문제점이 따르게 된다.¹⁾

따라서 가공 작업이나 공구의 비정상 상태에 대한 감시 및 대책에 관한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 가공 저항, 절삭 동력 및 가공음 등을 가공 공정중에 연속적으로 측정하기 위하여 다양한 센서를 활용한 감시 진단 기법들이 적용되고 있다.^{2,3)}

최근에 있어서는 공작물의 다듬질 가공 기법에 적용되는 연삭 가공에 있어서도 표면 품질의 향상 뿐만 아니라 생산성 극대화를 위한 가공 능률 향상에 관한 대책이 요구된다.⁴⁾

고품질의 연삭 가공면을 얻는 한편, 연삭 능률을 향상시키기 위한 대책의 일환으로서 작업중의 재드레싱 시점을 적절히 설정하는 방안을 들 수 있다.^{5,6)}

본 연구에서는 AE(Acoustic Emission) 센서 및 전류 센서를 사용하여 연삭 공정중의 상태를 연속적으로 감시함으로써 연삭 스톨 마멸 등의 거동을 파악하여 재드레싱 시기를 적절히 설정하는 한편, 연삭 가공면의 품질을 고찰하고, AE 센서 신호의 비교에 의하여 간접적으로 연삭 스톨의 상태를 예측할 수 있는 방안을 제시함으로써 연삭 스톨의 감시 진단 기법을 정립하고자 하였다.

2. 연삭 상태의 모니터링

연삭 가공에 있어서 연삭 스톨 입자의 마멸이나 탈락에 의한 이상(마찰 작용 등) 과정으로 인하여 정상상태와는 다른 비정상적인 연속형의 연삭 이상음이 발생한다.

AE 센서에 의하여 검출된 연삭음의 파형은 전기적인 신호로 변환되지만, 초기에 검출된 신호는 일반적으로 μV , mV 정도의 매우 미약한 크기를 지니고 있으므로, 적절한 신호 처리를 위해서는 수천 또는 수만 배의 증폭 과정이 요구된다.⁷⁾

실효 전압치는 이러한 신호들을 효율적으로 비교할 수 있는 인자가 되며, 다음의 식 (1)로 산정할 수 있다. 즉, 시간의 변화(t)를 기준으로 한 AE 신호의 파형을 $x(t)$ 로 가정하여, 실효 전압치로 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$RMS = \left\{ \int^{td} x^2(t) dt \right\}^{1/2} \quad (1)$$

연삭 동력의 변화를 판별하고자 자기에 응답하는 방식의 전류 센서를 이용하여 연삭반의 스핀들 구동용 모터의 전류를 측정하였다.

홀 소자는 고체의 홀 효과를 이용한 자기(磁器) 센서의 일종으로써, 출력 전압이 자계(磁界)에 비례한다는 특성을 지닌다.

홀 전압과 제어 전류의 관계식을 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_H = K \cdot I_c \cdot B \quad (2)$$

K : 곱감도(mV/mA·KG)

I_c : 제어전류(mA)

B : 자계(KG)

V_H : 홀전압(mV)

식 (2)로부터 알 수 있듯이 홀 전압은 제어 전류 I_c와 자속 밀도 B에 의하여 결정된다.

3. 가공 실험

3.1 실험 장치 및 시스템 구성

본 실험에서 사용한 연삭 실험 시스템의 개략도 및 사진을 각각 Fig. 1과 Photo 1에 나타내었다.

연삭기는 범용의 횡축 평면 연삭기(Model type YGS-50A, KOREA)를 사용하였으며, 주축 동력은 1.5kW이다.

AE 센서(S9204, DUNEGAN/ENDEVCO, USA)를 사용하여 연삭 가공에 있어서의 가공음을 측정하는 한편, 홀 소자 방식의 전류 센서(H-A050A0, HINODE, JAPAN)를 사용하여 연삭 가공시의 전류를 측정함으로써 간접적으로 소요 동력을 예측하였다.

연삭 가공면의 표면 거칠기는 3차원 비접촉 표면 측정기(NANOSURF 488, FRANCE)를 사용하여 측정하였으며, 표면상태는 입체현미경(Stereoscopic Microscope, CANON 210, JAPAN)을 사용하여 관찰하였다.

AE 센서는 신호 검출의 최적화를 위한 예비 실험을 통

하여 공작물 측면에 마그네틱 베이스를 이용하여 부착하는 방법이 가장 적절하다고 판명되었으며, 공작물의 크기를 작게하고 AE 센서를 중앙 부위에 부착함으로써 위치차이에 의한 검출 신호의 미소한 변화도 억제하였다. 검출 신호는 내장형의 증폭기를 통하여 충분히 증폭한 후, 고주파 및 저주파 필터링을 하고 RMS 값을 취하여 테이프 레코더에 기록하였다.

홀 소자 방식의 전류 센서를 연삭 스톨의 주축 구동용 모터에 연결하여 부착함으로써 검출 신호를 받았으며, 고주파 필터링을 한 후 RMS 값을 취하여 역시 테이프 레코더에 기록하였다.

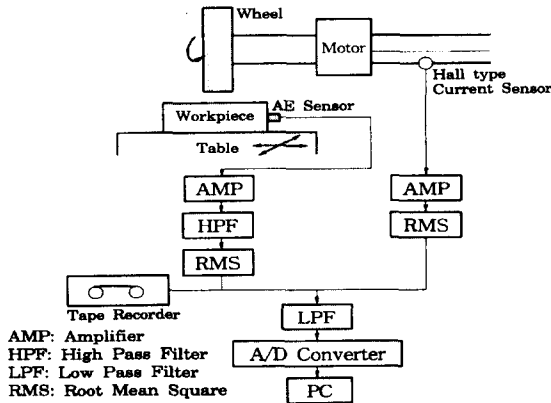


Fig. 1 Diagram of Grinding Experiment System



Photo. 1 Grinding Experiment System

본 실험에서는 외경 180mm, 내경 33mm, 폭 19mm의 1A1형 WA60K7V 연삭 스톨과 116(L)×80(W)×60(H)의 크기를 지니는 SM45C의 일반강을 각각 연삭 공구와 공작물로서 사용하였다.

공작물의 기계적 특성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of Workpiece (SM45C)

구분	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield point (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HrC)
SM45C	45	25	18	20

3.2 실험 방법

본 연구에서 수행한 실험의 조건을 Table 2에 비교하여 나타내었다.

Table 2 Experimental Conditions

Grinding Machine	Vertical type Surface Grinding machine
Motor Power of Grinding Spindle	Model type YGS - 50A 1.5kW
Workpiece	SM45C
Grinding Wheel	WA60K7V Size : 180×33×19(mm)
Grinding Cutting Type	Down & Up Cutting
Grinding Wheel Velocity	2,030m/min (2,590rpm)
Table Speed	12m/min
Depth of Cut	5, 10μm/pass
Cross Feed Rate	10mm/pass
Dressing	Dresser : Single Point Diamond Dresser Depth of cut : 20μm/pass Traverse Cutting Type Soluble Type Coolant with 50 Times

연삭 스톨의 진원도와 스톨 입자의 적절한 절삭 날끝 상태를 생성하기 위하여 수행한 초기 드레싱 공정에 있어서는 1.0 ct의 단석 다이아몬드 드레서를 이용하여 2,030m/min의 연삭 스톨 주속도와 12m/min의 테이블 이송 속도로서 20μm/pass의 절삭 깊이량을 가하며 5회 실시하였다.

절삭 깊이량을 5,10μm/pass로 변환하며, 10mm/

pass의 크로스피드 량을 가하는 트래버스 커팅 방식으로 공작물의 총 제거 누적 깊이를 20~280 μm 로 증대하는 연삭 가공을 수행함으로써, 연삭 스톨 가공면 상태의 거동을 파악하고자 하였다.

또한, 연삭 스톨 가공면의 마멸 진전에 따른 형상 변화를 연속적으로 가공 공정 중에 파악하고자 각 단계별 제거 누적 깊이에 도달한 시점에서 20 μm /pass의 절삭 깊이를 1회씩 가하는 드레싱 작업을 실시하였다.

총 제거 누적 깊이의 변화 따른 AE 검출 신호 및 전류 검출 신호의 차이와 가공 수행 직후에 있어서 재 드레싱을 수행할때의 AE 검출 신호의 변화, 가공면의 표면 거칠기 및 가공면 상태를 종합적으로 관찰, 비교하여 적절한 재 드레싱 시기를 설정하고 연삭 스톨 가공면의 형상을 간접적으로 예측 하고자 하였다.

3.3 실험 결과 및 고찰

드레싱을 수행한 후에 10 μm /pass의 절삭 깊이량, 10mm/pass의 크로스 피드량을 가하며 트래버스 연삭 방식으로 공작물의 총 제거 누적량을 증대해 가는 실험을 수행한 경우에 있어서, AE 검출 신호의 변화 과정을 구하여 Fig. 2에 나타내었다.

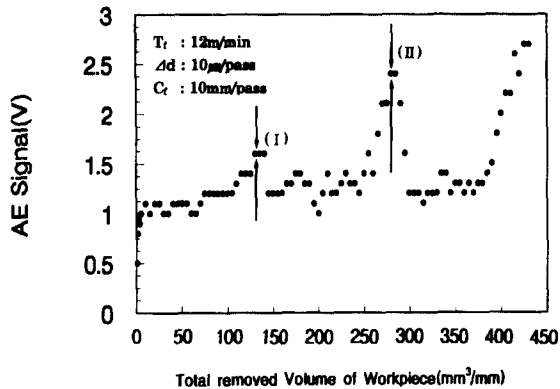


Fig. 2 Variation of AE Signal According to Total Removed Volume of Workpiece.

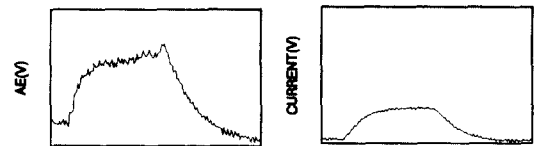
Fig. 2로부터 연삭 스톨과 공작물간의 간섭이 처음 발생하는 초기 연삭 구간에서는 AE 검출 신호가 급증하는 경향을 알 수 있다.

이러한 결과는 드레싱 직후의 불안정하게 지지되어 있는 일부의 스톨 입자들이 간섭 현상에 의하여 탈락되어지기 때문이라고 생각한다.

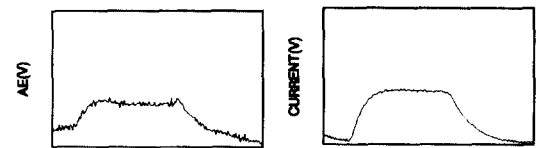
그후에 점차적으로 완만하게 상승하는 AE 검출 신호는 약 130mm³/mm의 총 제거 누적량에 도달하여 급증하였다가 다시 약간 저하되는 경향을 나타낸다.

이러한 결과로 부터 연삭 스톨의 마멸이 약간씩 증가하면서 부분적으로 스톨 입자가 탈락되고 자생 절삭날이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

약 280mm³/mm의 총 제거 누적량이 이루어진 시점에서 AE 검출 신호가 급증하다가 다시 저하되는 현상은 스톨 가공면 전체에 있어서 마멸이 상당히 이루어지는 한편, 칩 포켓에 과도하게 매워져 있던 칩들로 인하여 칩핑 작용보다는 과도하게 발생하는 미끄럼 작용으로 인하여 정상 연삭이 이루어지지 않다가 자생 절삭날 과정이 이루어져 연삭 스톨 가공면 전체에 걸쳐서 새로운 절삭 날끝이 돌출되어지기 때문이라고 생각한다.



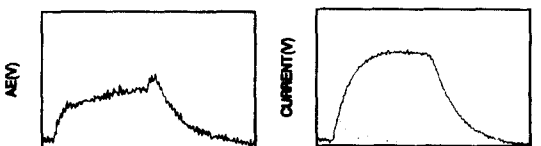
(a) Total removal rate 20 μm



(b) Total removal rate 80 μm



(c) Total removal rate 120 μm



(d) Total removal rate 160 μm

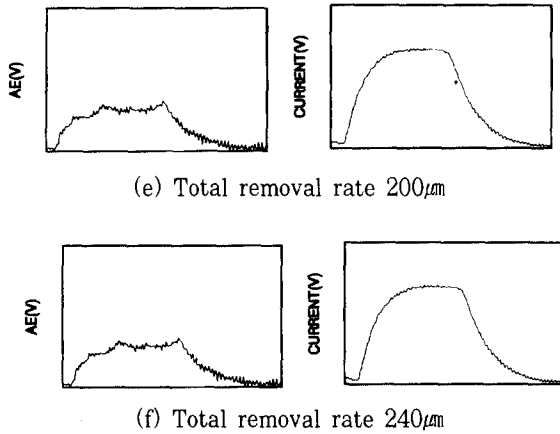


Fig. 3 Relationship between Total Removal Rate and AE, Current Signal Waveform(Depth of Cut 10µm/pass)

연삭 가공을 수행하여 점차적으로 총 절삭 제거 깊이량이 증대할 때에 있어서 임의의 시점에 대한 AE 및 전류 검출 신호를 비교하여 Fig. 3, 4에 나타내었다.

10µm/pass의 절삭 깊이량을 가한 경우인 Fig. 3으로부터 연삭 가공의 진전에 따라서 연삭 슷들의 마멸이 이루어져 AE 및 전류 검출 신호가 서서히 증가함을 알 수 있다.

연삭 가공의 초기인 Fig. 3(a)의 경우에 있어서 총 절삭 제거 깊이량이 더 큰 Fig. 3(b)의 경우보다 AE 검출 신호가 다소 높게 나타나는 것은 초기 드레싱 직후에 있어서 연삭 슷들 입자들이 불안정한 유지상태를 지니고 있어 예리한 절삭 날끝 상태에 의하여 절삭 작용이 잘 이루어지기 때문이라고 예측할 수 있다.

이러한 결과는 전류 검출 신호를 비교할때 Fig. 3(b)의 경우보다 낮게 나타나는 것으로써 재확인 할 수 있다.

Fig. 3(e)에 있어서 AE 검출 신호가 다소 높게 나타나고 전류 검출 신호가 낮게 나타나는 것은 부분적인 자생 절삭날 작용으로 인하여 연삭 슷들 입자들의 절삭 날끝이 돌출됨으로써 상대적으로 절삭 작용이 다소 원활해지기 때문이라고 생각한다.

Fig. 4는 5µm/pass의 절삭 깊이량을 가하는 경우로써 10µm/pass의 절삭 깊이량을 가하여 동일한 총 절삭 제거 깊이량을 가공한 Fig. 3(b), (e)에 비하여 전류 검출 신호는 약 1/2~2/3정도로 낮으며 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

또한, AE 검출 신호를 비교하면 Fig. 4(a)의 경우와 Fig. 3(b)의 경우가 동일한 총 절삭 제거 깊이량에 대한 것임에도 불구하고 아직 연삭 슷들 입자의 절삭 날끝이 상대적으로 매우 적게 마멸된 상태를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

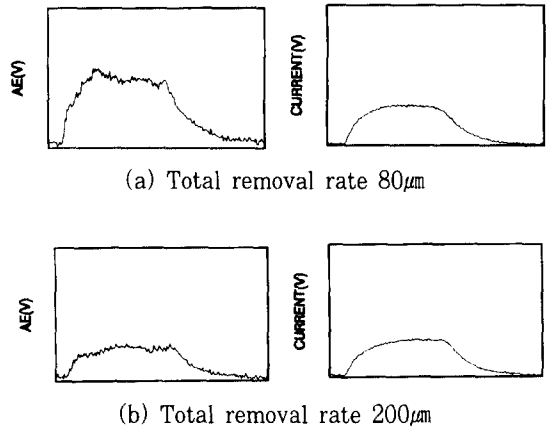
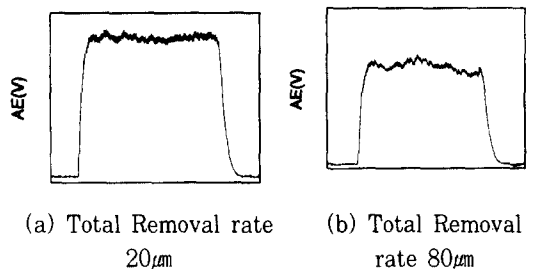


Fig. 4 Relationship between Total Removal Rate and AE, Current Signal Waveform(Depth of Cut 5µm/pass)

연삭 가공이 진전됨에 따라서 점차적으로 총 절삭 제거 누적량이 증대할 경우에 임의의 시점에 있어서의 연삭 슷들 가공면 상태를 연속적(In-process type)으로 파악하기 위하여, 드레싱 공정을 적용했을때 발생하는 AE 검출 신호의 파형을 비교하는 간접적인 측정 방식을 모색하였다.

10µm/pass의 절삭 깊이량으로 20~240µm의 총 절삭 제거 누적량이 되도록 가공을 수행한 후에 각각 드레싱을 한 경우에 있어서 나타난 AE 검출 신호 파형을 Fig. 5에 나타내었다.



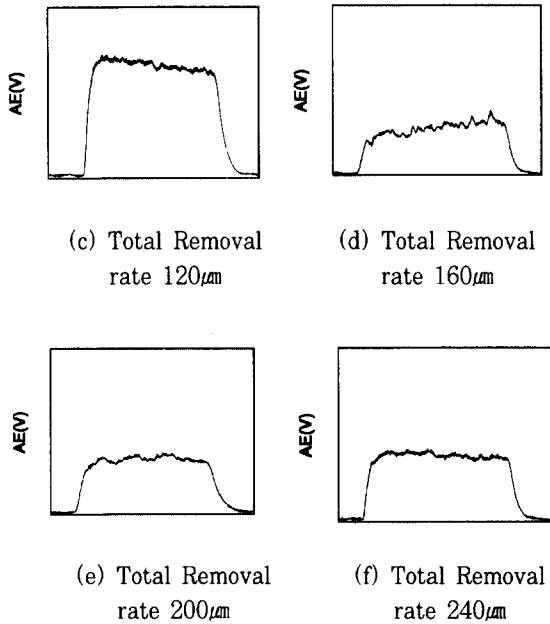


Fig. 5 Comparison of AE Signal Waveform Obtained during Dressing Process in each Total Removal Rate(Depth of Cut 10 $\mu\text{m}/\text{pass}$)

Fig. 5의 (a)로 부터 연삭 가공을 약간 수행했을 경우에는 연삭 스톨 가공면이 초기 드레싱을 수행했을 경우와 비교하여 거의 차이가 없는 정상적인 상태를 유지하고 있음을 알 수 있으며, 파형상의 요철 형상도 두드러지게 나타나 연삭 스톨 입자의 돌출 상태나 정상 날끝이 잘 이루어져 있음도 확인할 수 있다.

총 절삭 깊이량이 점차적으로 증대함에 따라 연삭 스톨 가공면의 양측 모서리 부위에 있어서 편마멸 현상이 나타나게 되어 가운데 부위가 볼록하게 되는 현상으로 서서히 변화되고 있음을 Fig. 5의 (b)에 나타난 AE 검출 신호 파형으로 부터 알 수 있다.

연삭 스톨 입자의 절삭 날끝이 마멸되면서 칩 포켓 부위가 작아지게 되어 연삭 눈막힘 현상이 발생되며, 따라서 칩 포켓이 배워져 있는 부위와 정상적인 부위에 있어서의 절삭 소요 에너지의 차이가 발생하여 AE 검출 신호 파형상의 기복이 형성되고 요철 부위의 정도가 상대적으로 작아짐도 역시 Fig. 5의 (b)를 통하여 확인할 수 있다.

연삭 눈막힘 현상이 두드러지게 나타나고 연삭 스톨 입자의 절삭 날끝 마멸 현상이 심화되면서 상대적으로 취약한 연삭 스톨 가공면 상의 부위에 있어서 자생 절인 효과가 생성되면서 Fig. 5의 (c), (d)와 같은 AE 검출 신호 파형으로 형상이 반복적으로 이루어짐을 관찰할 수 있다.

부분적인 자생 절삭날 현상이 이루어지다가 연삭 스톨 가공면 상의 형상이 다시 초기 드레싱 실시 후와 같은 거의 편평한 상태로 이루어지지만, 날카로운 스톨 입자의 절삭 날끝은 형성되지 못하고 부분적으로 비정상적인 상태를 유지하게 됨을 Fig. 5의 (e), (f)의 AE 검출 신호 파형으로서 확인할 수 있다.

5 $\mu\text{m}/\text{pass}$ 의 절삭 깊이량으로 80, 200 μm 의 총 절삭 제거 누적량이 되도록 가공을 수행한 후에 각각 드레싱을 한 경우에 있어서 나타난 AE 검출 신호 파형을 Fig. 6의 (a), (b)에 나타내었다.

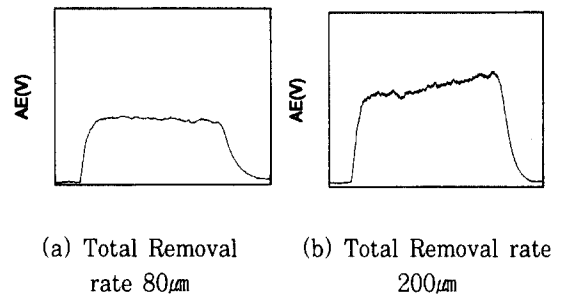


Fig. 6 Comparison of AE Signal Waveform Obtained during Dressing Process in each Total Removal Rate(Depth of Cut 5 $\mu\text{m}/\text{pass}$)

Fig. 6의 (a)와 Fig. 5의 (b)를 비교하면 절삭 깊이를 작게 가하는 경우에 총 절삭 제거 깊이량이 동일해도 상대적으로 연삭 스톨의 형상 변화가 거의 나타나지 않고 절삭 날끝의 마멸만이 다소 진행된 상태를 알 수 있다.

또한, Fig. 6의 (b)로 부터 200 μm 의 총 절삭 제거 깊이량이 되었을때 10 $\mu\text{m}/\text{pass}$ 의 절삭 깊이량으로 160 μm 의 총 절삭 제거 깊이량이 되도록 가공한 Fig. 5의 (d)에서의 AE 검출 신호 파형과 유사하게 연삭 스톨의 편마멸 현상이 나타남을 알 수 있다.

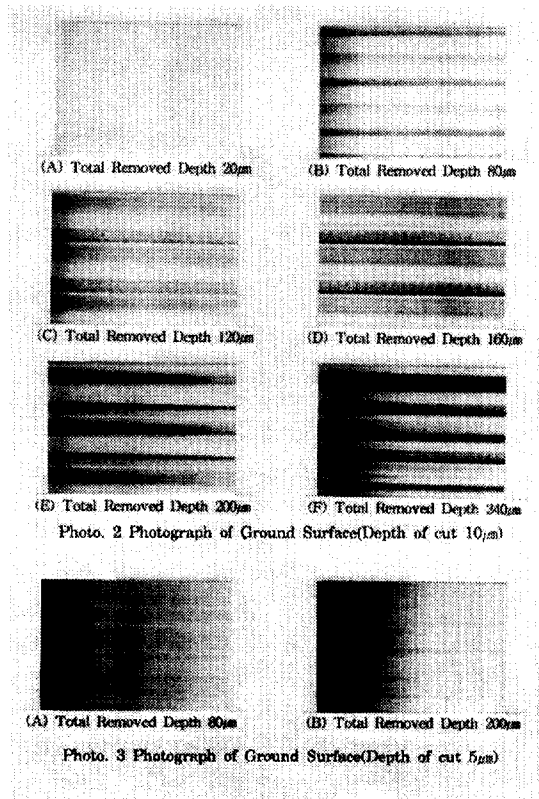
이러한 결과로 부터 동일한 연삭 스톨과 가공 조건을

이용해서 가공을 수행하더라도 절삭 깊이량의 변화가 연삭 슷들의 마멸 현상에 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

10, 5 μ m/pass의 절삭 깊이량을 각각 가하며 연삭 가공을 수행하는 경우에 있어서 총 절삭 제거 깊이량의 증대에 따른 공작물의 표면 상태를 촬영하여 Photo. 2, 3에 나타내었다.

Photo. 2, 3으로부터 총 절삭 제거 깊이량이 증가할 수록 연삭 높음 및 채터 진동 무늬의 발생이 점차 두드러지게 나타남으로써 가공면의 표면 상태가 악화됨을 확인할 수 있다.

Photo. 3으로부터 상대적으로 절삭 제거 깊이량을 적게 가하는 경우에 있어서 가공면의 표면 상태가 양호함을 알 수 있다.



4. 결 론

본 연구를 수행함으로써 얻은 주요한 결과들을 나타내

면 다음과 같다.

1. AE 및 전류 센서를 이용한 연속 감시 방법에 의하여 가공 공정중의 연삭 상태를 효율적으로 진단할 수 있으며, 재드레싱 시기를 적절히 설정할 수 있다.
2. 가공 공정중에 드레싱 작업을 수행하여 얻은 AE 센서의 검출 신호 파형을 관찰, 비교함으로써 임의의 시점에서의 연삭 슷들 가공면 형상을 간접적으로 예측할 수 있다.
3. 동일한 연삭 슷들과 가공 조건을 이용하여 가공을 수행하더라도 절삭 깊이량의 변화가 연삭 슷들의 마멸 정도에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 大河出版社, "高能率研削", p. 113, 1980.
2. S. Kawamura, M. Mitsuhashi, "Studies on the Fundamental of Grinding Burn(3rd Report)", JSPE, Vol. 49, No. 6, p.1134, 1981.
3. 謝榮哲, 稻崎一郎, "AEを利用した目直しおよび研削プロセスの監視", 日本機械學會論文集, Vol. 51, No. 468, 1984.
4. 機械振興協會技術研究所, "加工技術データファイル", 東京, p. 91, 1984.
5. R. Honda, "Effects of Dressing Conditions on Periodicity of Ground Surface Roughness", JSPE, Vol. 50, No. 2, p. 371, 1984.
6. König, W. Mey, H. P., "An In Grinding and Dressing, Accuracy and Process Reliability", Proc. 4th Int. Grinding Conf. Technical Paper MR90-526, SME, Detroit, Michigan, 1990.
7. Hiroshi EDA, Kozo KISHI, Nobuyuki USUI, Yoshiaki KAKINO, Akihiko FUJIWARA, "In-Process Detection of Grinding Burn by Means of Utilizing Acoustic Emission", JSPE, Vol. 49, No. 9, 1983.
8. Masaki WADA, Makio MIZUNO, Tadasi SASADA, "Study on Friction and Wear Utilizing Acoustic Emission", JSPE, Vol. 56, No. 8, 1990.