

AE 신호에 의한 연삭가공 표면거칠기 검출 Extraction of the Surface Roughness in Grinding Operation by Acoustic Emission Signal

정 성 원*
Sung-Won Chung*

<Abstract>

An in-process extraction method of the ground surface roughness is a bottle-neck and essential field in conventional machining process. We define the D.A.R.F(Dimensionless Average Roughness Factor) that has a roughness characteristic of ground surface. D.A.R.F include the absolute average and the standard deviation values which are the analytic parameters of the AE(Acoustic Emission) signal generated during the grinding operation. The theoretical equation between the surface roughness and the D.A.R.F has been derived from the linear regressive analysis and verified its availability through the experimentation on the surface grinding machine.

Key words : *Acoustic Emission, Grinding Operation, D.A.R.F, Surface Roughness, Linear Regressive Analysis,*

1. 서 론

최근 제품 생산에 있어서는 저 비용을 통한 생산성 향상과 고정밀도를 달성하기 위해 각종 가공과정에서 신뢰성이 뛰어난 자동화 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 특히 연삭가공은 부품의 치수보다는 표면의 품질을 결정짓는 최종가공 단계이므로 표면거칠기의 자동 검출의 필요성이 매우 크지만 가공 메카니즘(Mechanism) 특성상 표면거칠기에 관여

하는 요인이 다양하고, 이들 사이의 인과 관계가 불분명하다. 따라서 표면거칠기의 정확한 예측이 힘들어 연삭공정의 자동화에도 커다란 장애요인이 되고있다. 연삭가공에서 표면거칠기를 평가하기 위하여 해석적으로 이론식을 얻고자 하는 연구가 Ono^[1] 등에 의하여 이루어졌다. 이 연구에서는 슷돌경로의 기하학을 기초로 해서 슷돌면 상에 규칙적으로 배열되고 형상이 일정한 입자 절삭날을 가정하여, 절삭날이 공작물을 통과하면 절삭날의 기하학적 형상이 공작물에

* 정회원, 밀양대학교 기계공학과 교수
일본대학 대학원 박사과정 수료
627-130 경남 밀양시 내이동 1025-1
Tel : 0527-350-5422
E-mail : swchung@arang.miryang.ac.kr

본 논문은 1995학년도 밀양대학교 기성회계 학술연구비의 지원을 받아 작성된 것임
Prof, Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University.
1025-1 Neidong, Miryang, Kyungnam, 627-130, Korea

그대로 남는 것으로 취급하였다. 그러나 이러한 가정은 연삭가공의 실제와는 차이가 있어서 표면거칠기의 이론식에서 얻어지는 수치는 실측치와는 상당한 차이가 있다^[2]. 측정기술의 진보와 측정기의 개발로 다양한 측정방법에 의한 표면거칠기의 측정치를 비교한 연구가 이루어졌으나, 그 결과가 촉침(Stylus)에 의한 측정방법 보다는 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다^[3-6]. 그러나 촉침에 의한 표면거칠기의 측정에 있어서도 촉침의 반경의 영향 및 주사 속도(Scanning Speed)의 문제 등 측정에 따른 다양한 문제점이 있는 것으로 나타났다^[7,8]. 또한 이들 연구에서는 표면거칠기의 측정이 가공과정 중에 또는 기상(on-the-machine)에서 직접 이루어질 수가 없어서 연삭가공 자동화를 어렵게 만드는 공통된 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 표면거칠기의 검출과정을 자동화 시스템에 포함시키기 위해 연삭가공 중에 발생하는 고주파 AE(Acoustic Emission) 신호를 센서를 부착하여 획득하고, 얻어진 신호를 컴퓨터에 저장, 데이터 분석을 통하여 표면거칠기 특성을 나타내는 무차원 계수를 정의하였다. 계산된 무차원 계수를 선형 회귀분석기법을 통하여 표면거칠기 예측 근사 계산식을 만들고, 이로부터 중심선 평균거칠기 값(Ra)을 기상에서 인프로세스(In-Process)로 직접 검출할 수 있음을 제안하고 그 결과를 실험을 통하여 검증하였다.

2. 표면거칠기 이론

표면의 상태는 표면품위(Integrity)와 표면 조직(Texture)의 두 가지 관점에서 생각할 수 있다. 표면품위는 가공으로 생성된 표면층의 기계적, 금속학적인 변화를 의미하며, 연삭에서 표면품위와 관련하여 가장 중요한 사항은 연삭 온도에 의한 열적인 손상과 잔류응력이 있다. 표면조직은 가공된 표면의 미시적 관점의 모양(Microgeometry)이나 형태(Topography)를 의미하며 일반적으로 표면거칠기를 의미한다. Fig. 1은 SEM으로 촬영한 연삭가공 표면의 일례이다.

표면거칠기 중에서도 연삭가공이 진행된 방

향의 표면거칠기 값이 이송 방향보다 산과 골이 더 넓게 분포하며 평면 연삭가공 공정의 기본적인 메카니즘은 Fig. 2와 같다.

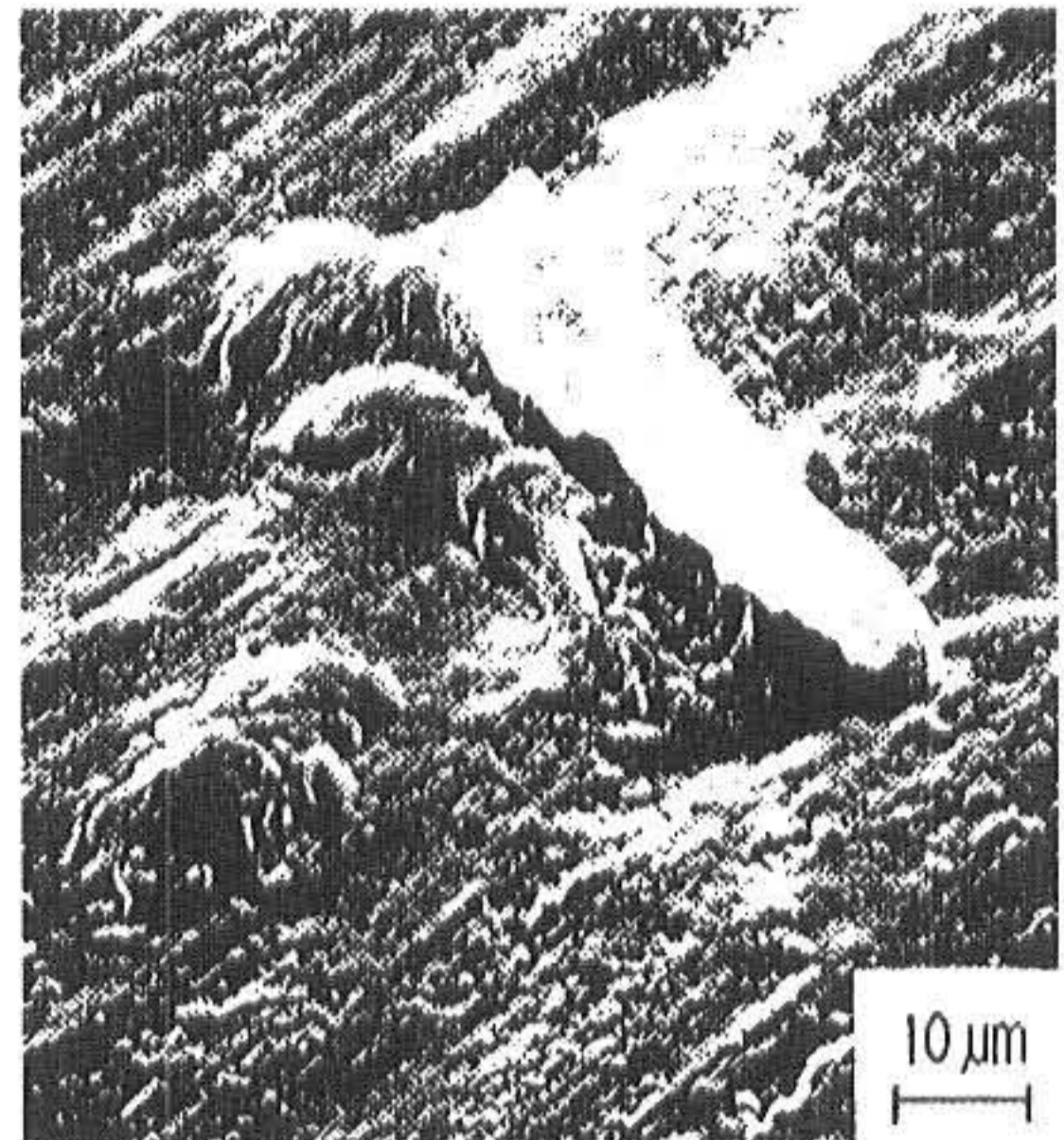


Fig. 1 SEM Micrographs of Ground Surface after Surface Grinding

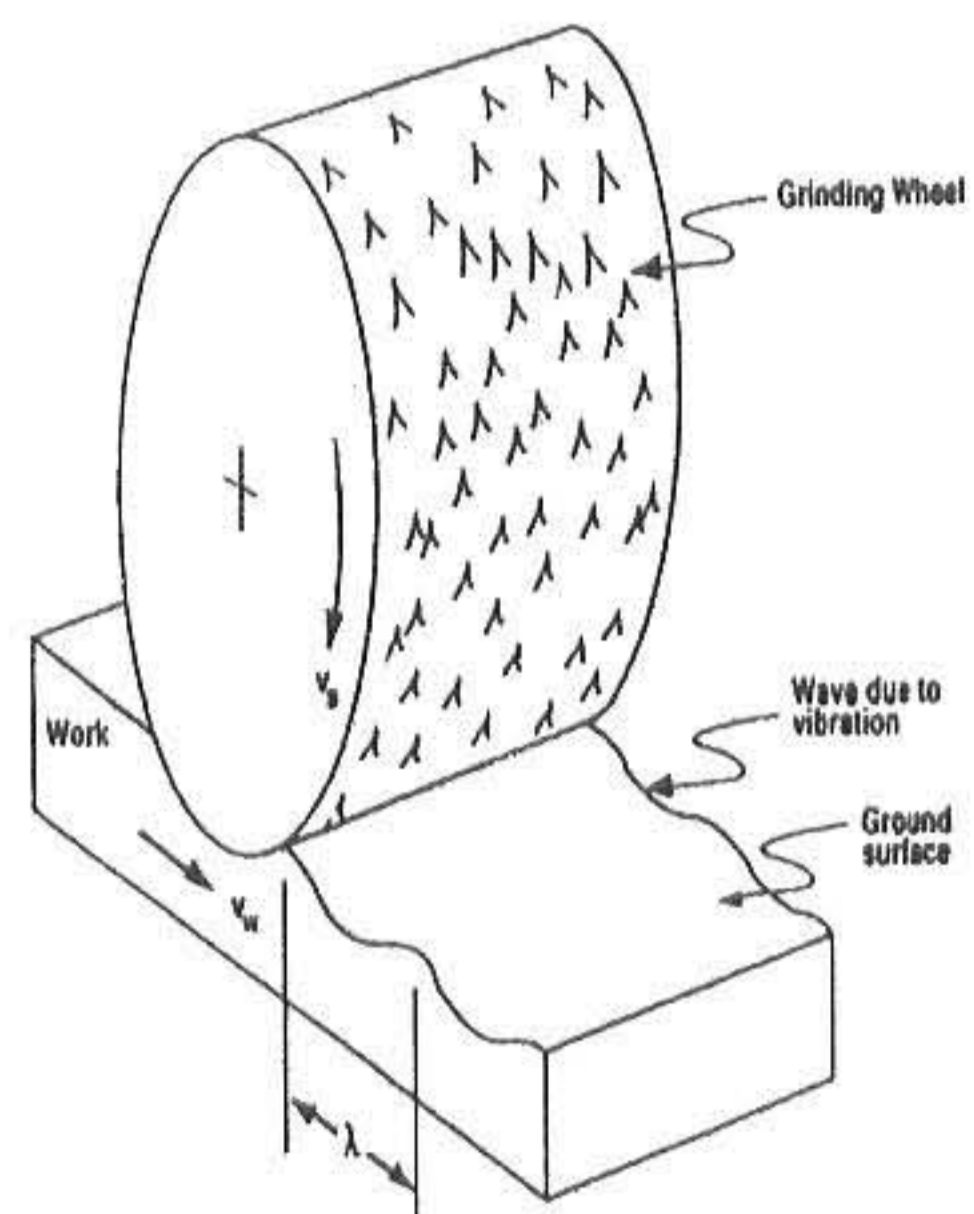


Fig. 2 Illustration of Waviness Generation in Surface Grinding

표면조직은 가공된 공작물의 산(Hill)과 골(Valley)로 구성된 독특한 형태를 말하며 혼동을 피하기 위해 표면 조직의 특성을 간단히 설명하면 다음과 같다.

연삭가공으로 얻고자 하는 공작물의 전체적인 모양을 넓은 의미로 형상(Form)이라 하고

그 형상 내에서 공작물의 비교적 큰 영역에 걸쳐서 나타나는 저주파의 굴곡을 파상도 (Waviness), 그리고 파상도 내에서 나타나는 아주 짧은 구간에서 나타나는 표면상의 고주파의 높이변화를 표면거칠기 (Surface Roughness) 라 하고 이들을 Fig. 3에 나타내었다.

표면거칠기는 일반적으로 스타일러스 (Stylus) 로 측정한다. 표면 거칠기의 양적인 평가는 파상도의 간격보다는 짧은 형상 중에서 충분한 표본수를 획득할 수 있도록 샘플 길이를 선택한다. 따라서 샘플의 길이는 거칠기와 파상도의 구분 기준이 된다. 다듬질 면의 거칠기 측정에 대한 일반적인 샘플 길이는 0.8mm 정도가 사용된다. 또 샘플 길이 안에서 파상도 보다 긴 저주파가 표면거칠기 값에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해서 컷오프 값을 설정한다. 컷오프는 샘플링 길이의 3배로 하는 것이 일반적이다.

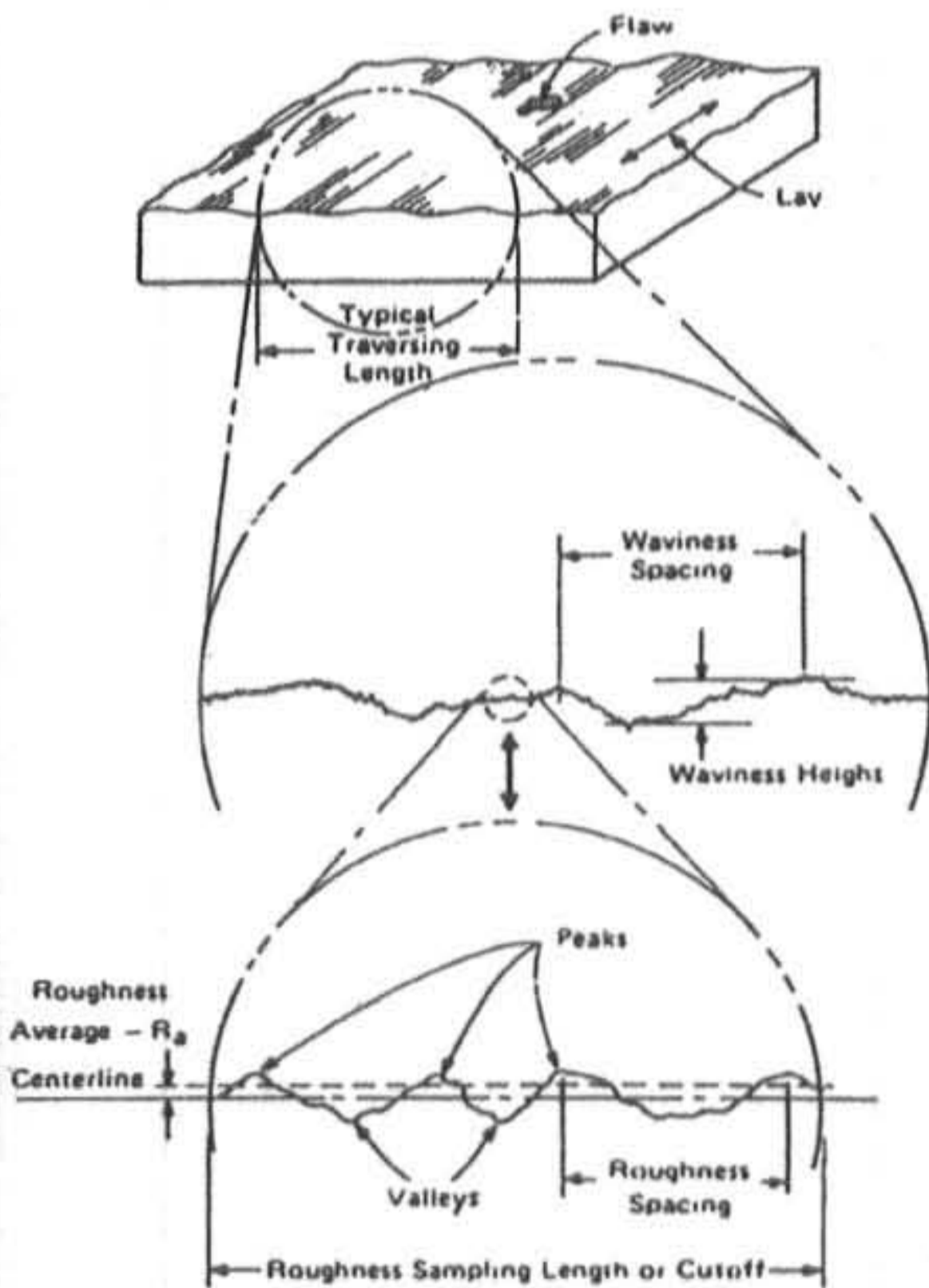


Fig. 3 Definition of Surface Texture

3. 연삭가공에서 AE의 적용

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나게 되면 재료 내부에 축적되어 있던 변형에너지 (Strain Energy)는 파면

형성에너지, 열에너지, 격자변형에너지 그리고 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이 중에서 외부에서 계측장치의 힘에 의해서 가시적으로 검출된 탄성파를 AE 신호라고 하며, 탄성파 자체 그리고 탄성파를 검출하는 수단 및 해석을 통틀어 AE 법 또는 AE 기법이라 말한다. 탄성파는 본질적으로는 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동하여 가는 현상이며, 이러한 진동이 압전센서에 의해서 전기적 신호로 변환될 때 비로소 AE 신호로 검출되게 된다.

Fig. 4는 연삭가공에서 얻어지는 AE 원신호 (Raw Signal)를 나타낸다. 가공공정의 감시 (Monitoring)에 AE 신호를 이용하는 가장 큰 이유는 AE 신호의 주파수 대역이 대략 100~800KHz의 고주파로 저주파 영역의 잡음 (Noise)을 효과적으로 제거하면 신뢰성 있는 감시시스템을 구성할 수 있기 때문이다^[9-11]. 그러나 주파수가 높기 때문에 원신호를 얻기 위해서는 고속처리가 가능한 고가의 DSP 보드가 필요하다는 단점이 있어서, 일반적으로 원신호를 획득하지 않고 변조의 방법^[12]을 이용하거나 RMS 처리된 신호^[13]를 얻어서 감시시스템을 구성하고 있다.

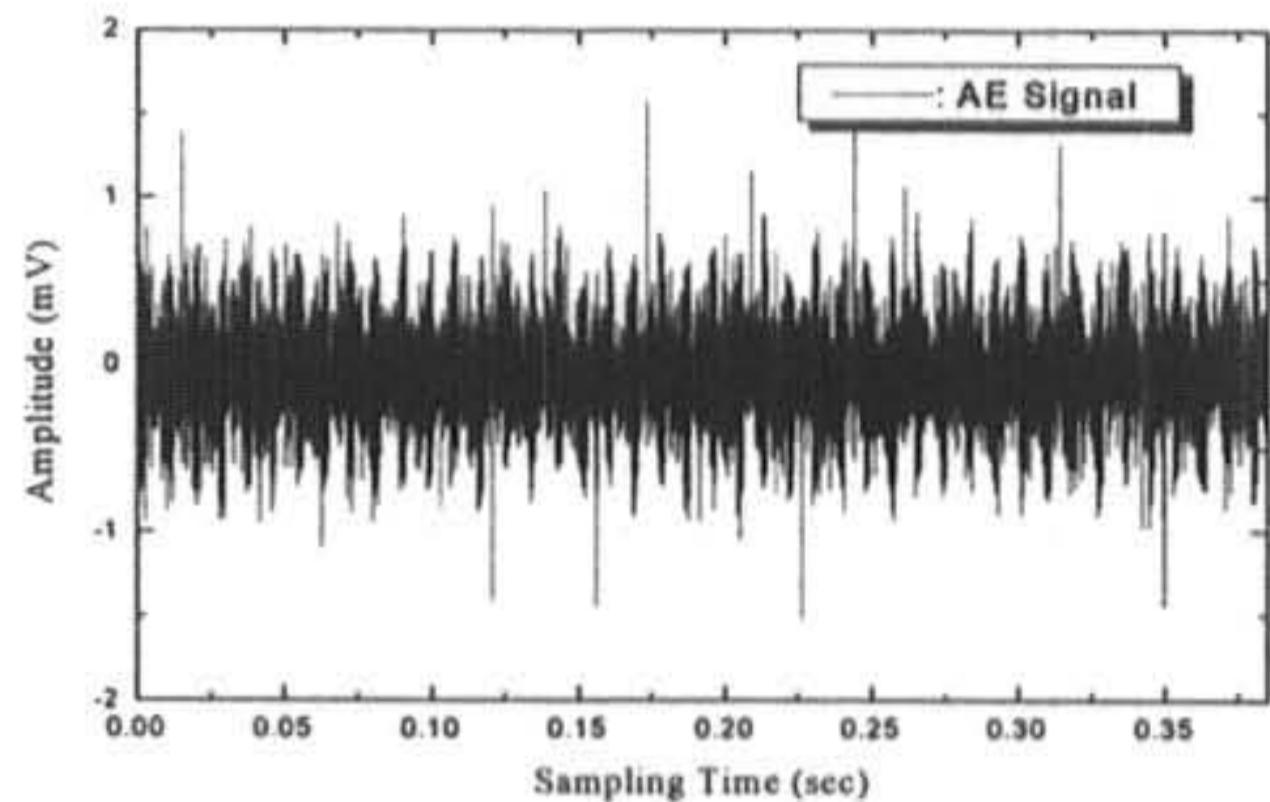


Fig. 4 AE Signal Measured in Grinding Operation

본 연구에서는 예비실험을 통하여 연삭가공 중에 발생하는 AE 신호의 진폭과 신호특성이 변함에 따라서 표면거칠기 값이 변하는 것을 확인하고 이로부터 인프로세스로 근사적인 표면거칠기 값의 예측을 시도하였다. 진폭의 변동을 검출하기 위하여 AE 신호의 절대평균 (Absolute Average)을 하나의 변수로 사용하였

고, 신호의 분산의 정도를 평가를 위해서는 AE 신호의 표준편차(Standard Deviation) 값을 이용하였다. Fig. 5는 본 실험에서 사용한 프리앰프의 내부회로도와 주파수 응답 특성을 나타낸다.

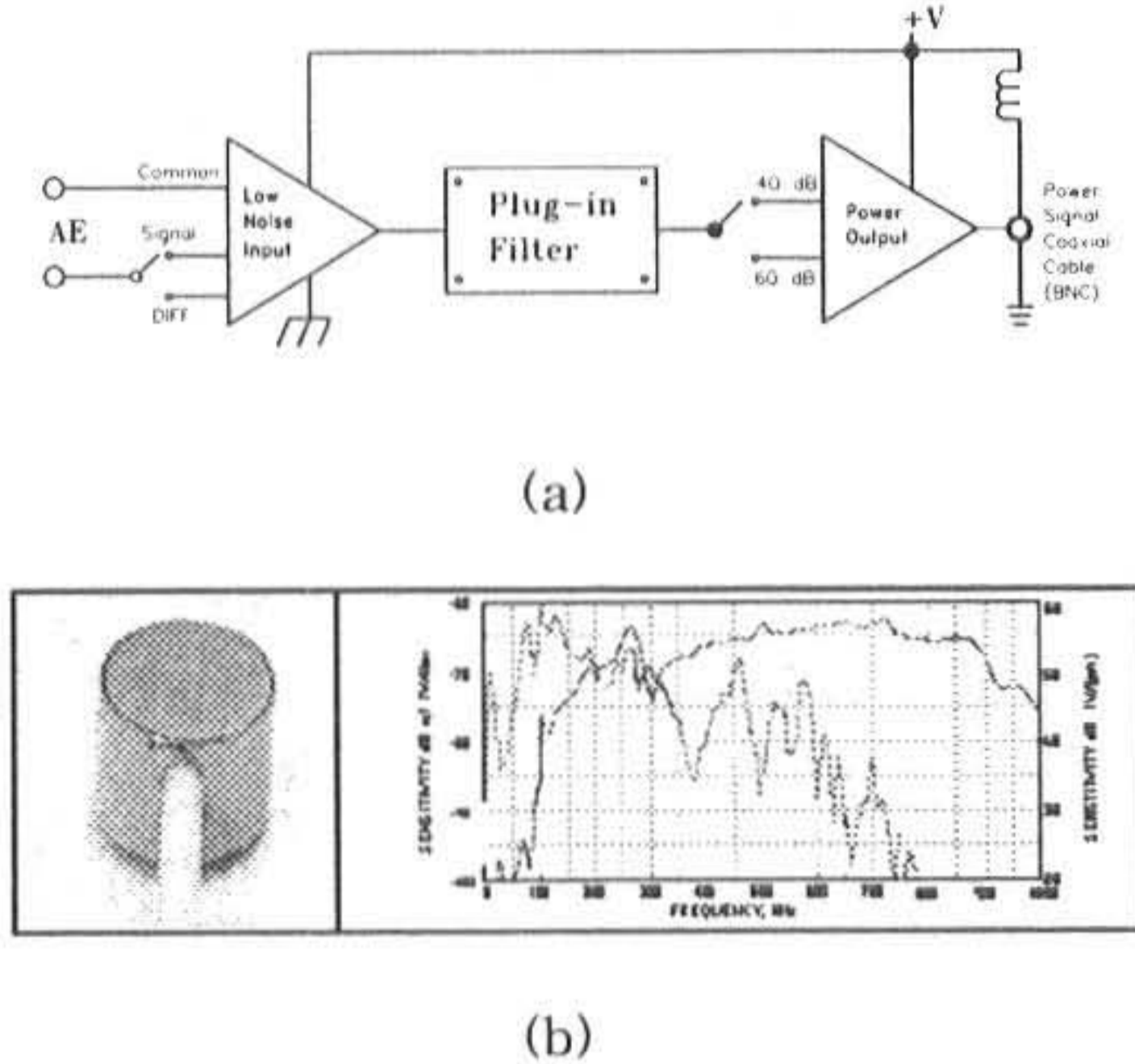


Fig. 5 Circuit of Pre-amplifier and Sensitivity of AE Sensor

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 WA60K7V 슛돌로 난삭재 금형강인 STD11과 STD61을 마그네틱 척에 고정하여 평면연삭을 행하였고, 가공 중에 AE 신호를 효과적으로 얻을 수 있도록 AE 센서를 공작물의 측면에 부착하였다. 본 연구에서 사용한 실험장치의 구성도를 Fig. 6에 나타내며 각 장비의 사양은 Table 1과 같다.

AE 신호의 획득은 잡음에 강인한 차동형의 광대역(Wide Band) 센서를 통하여 검출되고, 신호가 감쇠되는 것을 방지하기 위하여 프리앰프(Pre-amplifier)에 내장된 주파수 범위가 100~1200kHz의 대역통과 필터를 거치고 난 후 신호를 40db 증폭하였다. 검출되고 있는 AE 신호의 변화 거동을 관찰하기 위하여 오실로스코프(Oscilloscope)로 얻어지는 신호를 시각화하였고, 12 비트의 분해능을 갖는 A/D 변환기를 사용하여 AE 센서에서 얻어진 전기적 신호를 디지털화 하여 컴퓨터에 저장하고, 표면 거칠기와

의 상관계수를 구하기 위하여 신호분석을 실시하였다. 실험조건은 Table 2와 같고, 가공된 공작물의 표면거칠기는 스타일러스 타입의 표면조도계를 사용하였다.

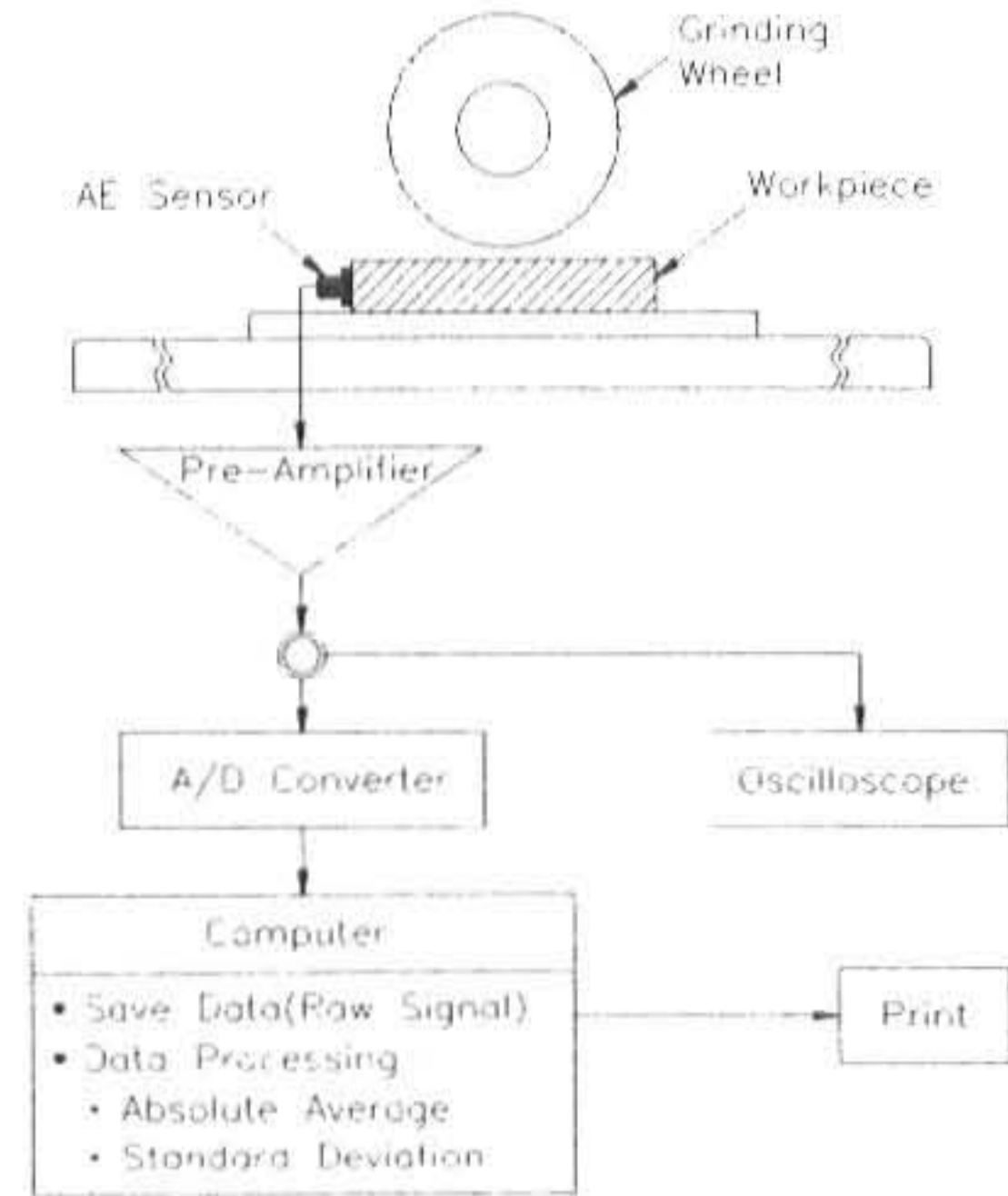


Fig. 6 Measurement Status of the AE Signal

Table 1 Specifications of Equipments

| Equipments | Type & Features |
|-------------------|---------------------------------------------------------|
| Grinding Machine | Spindle Speed : 2800 rpm Spindle Motor : 0.75 Kw |
| AE Sensor | SN A-82 Wide Band |
| Pre-amplifier | Physical Acoustic Cor. 1220A 40/60 db Selective Gain |
| Oscilloscope | Hitachi Denshi, VC-6023 2 Channel Digital Storage |
| A/D Converter | 12 Bits A/D Resolution |
| Personal Computer | 586-200 |

Table 2 Experimental Conditions

| Factors | Experimental Condition |
|------------------------|------------------------|
| Wheel Velocity, Vs | 1320 m/min |
| Workpiece Velocity, Vw | 10, 20 m/min |
| Depth of Cut, h | 5, 10, 15 μ m |
| Coolant | Not Used |
| Cutting Method | Down Cut |

4.2 결과 및 고찰

이와 같은 장치와 조건하에서 가공된 공작물의 표면거칠기를 측정된 결과는 Fig. 7에 나타내었다. AE 신호의 절대평균과 표준편차 값의 변화를 구하고, 그때의 중심선 평균거칠기를 측정식 측정기로 측정된 결과를 이용하여 가공중에 연삭가공 거칠기의 예측을 시도하였다. AE 신호의 절대평균과 표준편차 값의 변화에 따라서 표면거칠기 값이 거의 선형적으로 변화됨을 알 수가 있었고, 이러한 관계로부터 절대평균과 표준편차 값으로 구성되는 표면거칠기 계산식을 유도할 수 있다.

표면거칠기의 예측을 실현하기 위해서는 표면거칠기 변화에 민감한 AE 신호성분을 검출하여 정량화 시키는 것이 필요하다. 표면거칠기 계산식을 유도하기 위하여 무차원 평균 표면거칠기 계수(Dimensionless Average Roughness Factor, D.A.R.F)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{D.A.R.F} &= \frac{\text{Absolute Average}}{\text{Standard Deviation}} \\
 &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 n은 데이터의 갯수, x_i 는 획득된 AE 신호값, \bar{x} 는 AE 신호의 평균값이다.

AE 신호로부터 계산된 D.A.R.F와 가공된 공작물을 표면조도계로 측정된 값을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 이들 그림에서 AE 신호와 표면거칠기의 관계가 거의 선형적이므로 각각 1차 회귀식을 구하였다.

두 회귀식을 살펴보면 기울기는 유사하고, 상수항에서는 STD61이 STD11 보다 150% 이상의 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 연삭가공에서 STD11과 STD61인 재료를 동일한 표면거칠기를 갖도록 가공할 때 STD61이 STD11 보다 D.A.R.F 값이 더 크다는 것을 의미하고, 이것은 높은 경도를 갖는 공작물에서 AE 신호의 표준편차의 변화보다는 진폭(절대평균)이 급격히 증가하기 때문이라고 생각할 수 있다. 구해진 회귀식을 신호처리 프로그램에

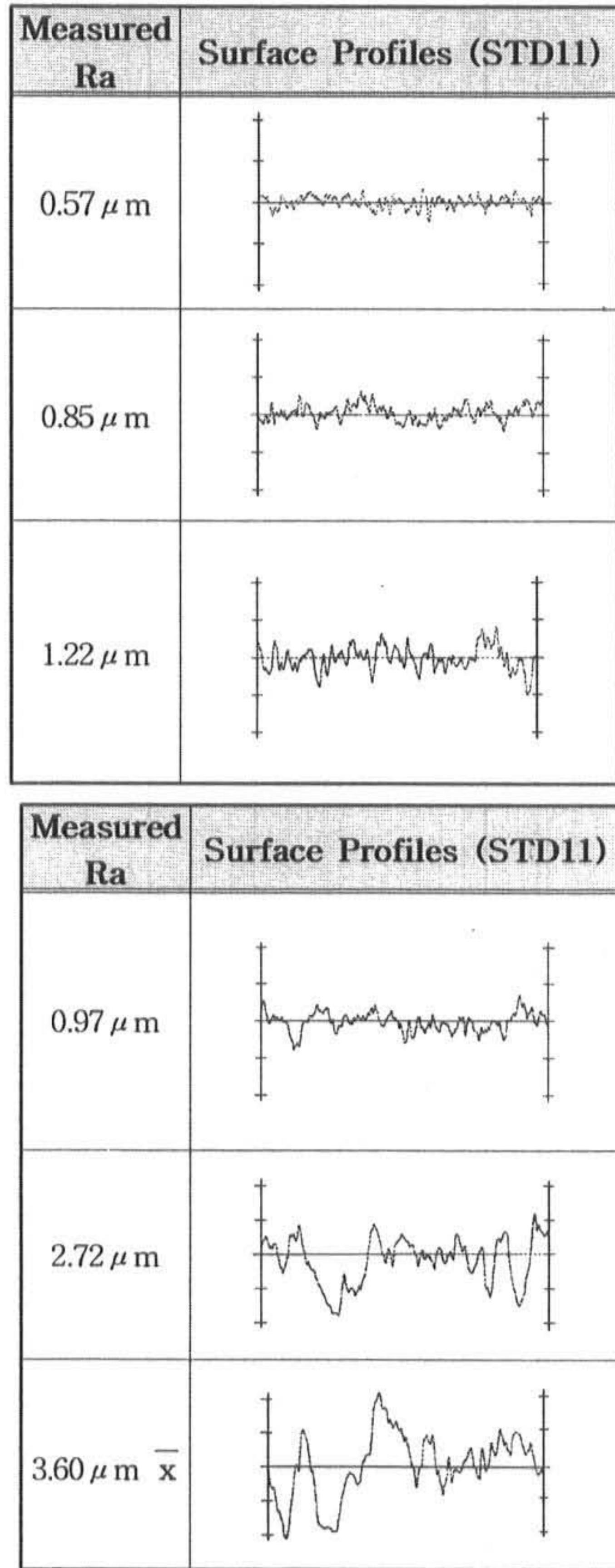


Fig. 7 Measured Roughness Profiles of the Ground Surface in STD11 and STD61

삽입하여 연삭기의 척에 공작물이 고정되어 가공되고 있을 때 숫돌이 가공한 공작물의 온라인(On-Line) 표면거칠기 예측을 시도하였다. 회귀식의 유효성을 평가하기 위해서 실험조건인 테이블 속도와 절입깊이는 랜덤하게 설정하

였다.

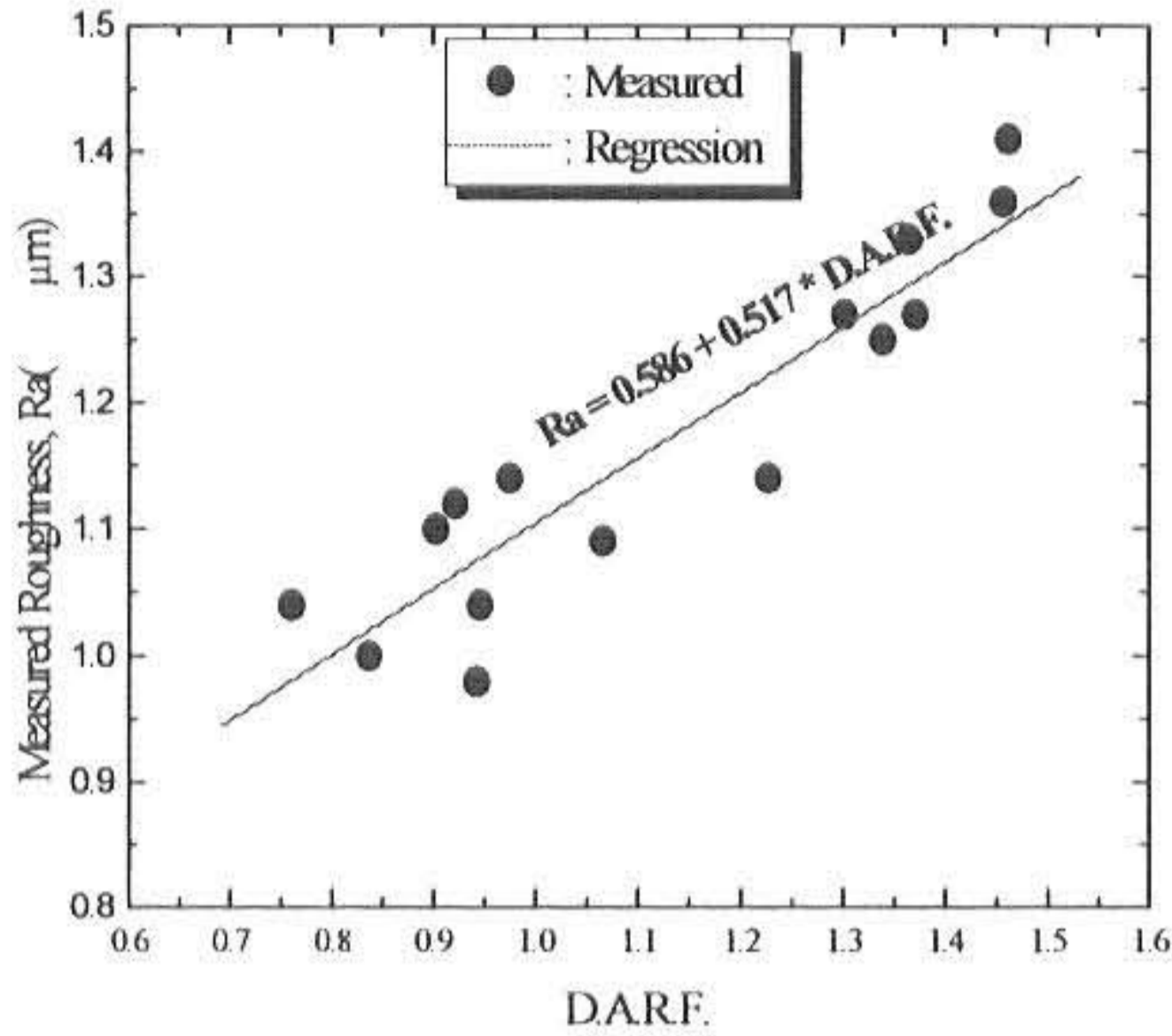


Fig. 8 Measured Surface Roughness versus D.A.R.F in STD11

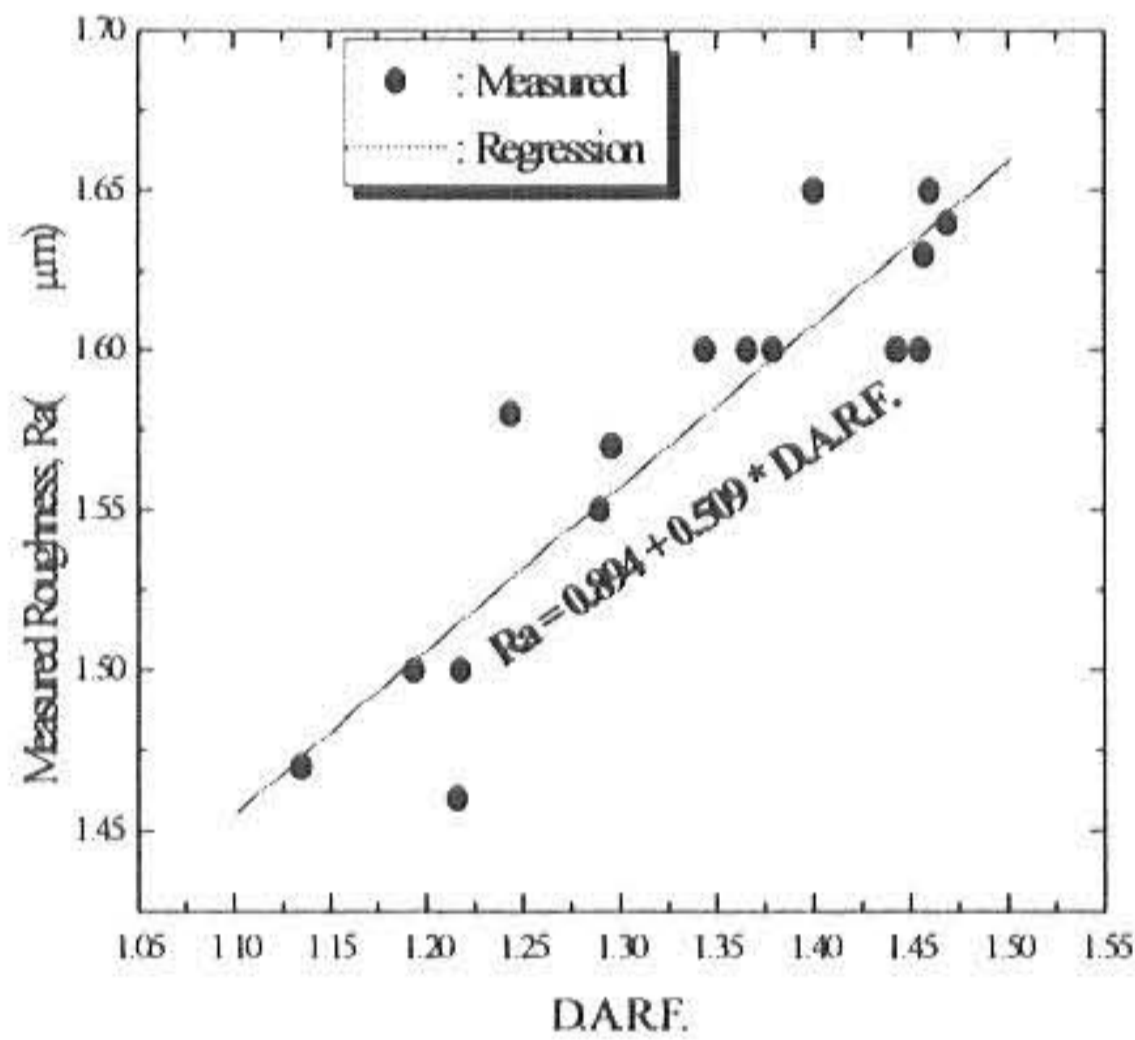


Fig. 9 Measured Surface Roughness versus D.A.R.F in STD61

구해진 회귀식을 사용하여 온라인(On Line)으로 표면거칠기 값의 근사 예측을 시도하여 회귀식의 유효성과 표면거칠기 값의 근사 예측의 가능성을 검토하였다.

Fig. 10은 STD61을 가공할 때 AE 신호와 회귀식으로 연삭가공 중에 예측한 표면거칠기 값과 가공이 완료된 후에 스타일러스로 측정된 표면거칠기 값을 나타내며, 두 값이 매우 유사

하게 얻어 졌다. 예측된 Ra값과 측정된 값의 오차량을 나타내기 위해 오차율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Error Rate(\%)} = \frac{| \text{Estimated Ra} - \text{Measured Ra} |}{\text{Measured Ra}} * 100 \quad (2)$$

구해진 오차량을 Table 3에 나타내었다. 오차량의 크기는 대부분이 10% 미만의 매우 작은 값으로 나타났고, 최대 오차가 13.2%의 값을 갖는다.

연삭가공에서는 측정된 표면거칠기 값이 측정부위에 따라서 약간의 변동량을 포함할 뿐만 아니라, 수 마이크로미터 단위의 크기에서의 오차는 기상에서의 인프로세스로 표면 거칠기를 근사 예측했다고 하는 관점에서 본다면 매우 우수하다고 생각할 수 있기 때문에, AE 신호로부터 계산된 D.A.R.F를 이용한 온라인 표면거칠기 검출이 유효함을 알 수 있다.

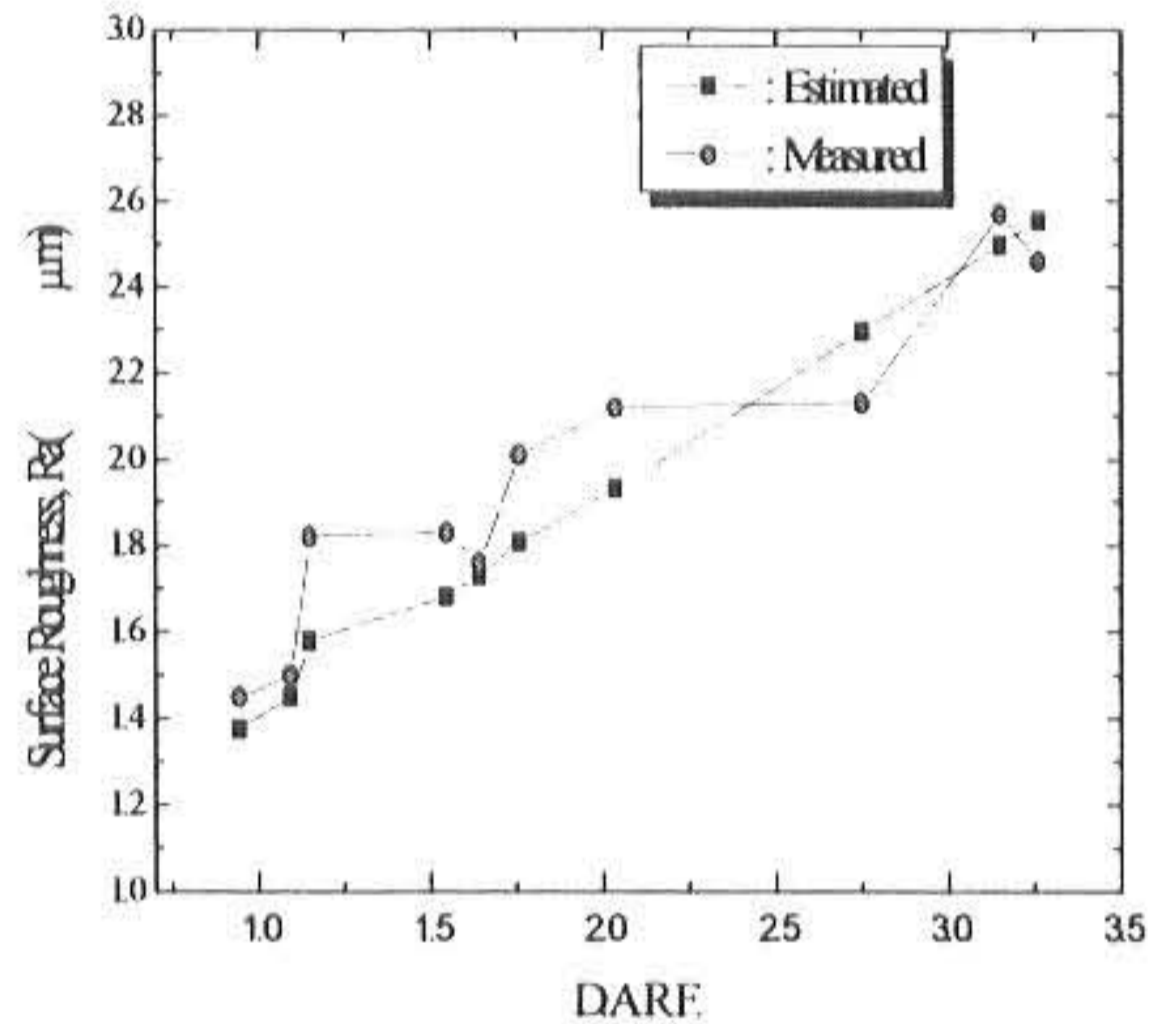


Fig. 10 Estimation Results of Surface Roughness for STD61

5. 결 론

본 연구는 평면연삭에서 가공 중에 발생하는 AE 신호를 획득하여, 이를 바탕으로 근사적인 표면거칠기를 기상에서 검출하는 것을 목적으로 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Table 3 Calculated Error Rate for STD61

| Estimated Ra | Measured Ra | Error Rate(%) |
|--------------|-------------|---------------|
| 1.376 | 1.45 | 5.1 |
| 1.450 | 1.50 | 3.3 |
| 1.579 | 1.82 | 13.2 |
| 1.682 | 1.83 | 8.1 |
| 1.73 | 1.76 | 1.7 |
| 1.808 | 2.01 | 10.0 |
| 1.931 | 2.12 | 8.9 |
| 2.295 | 2.13 | 7.7 |
| 2.498 | 2.57 | 2.8 |
| 2.554 | 2.46 | 3.8 |

- (1) 가공 중에 발생하는 AE 신호를 획득하여 데이터 처리를 통해 신호의 절대평균과 표준편차 값을 사용하여 무차원 평균 거칠기 계수(D.A.R.F)를 정의하고 표면거칠기와 AE 신호가 상관관계가 있음을 규명하였다.
- (2) 동일한 거칠기 값이 얻어지는 경우에도 공작물의 경도가 높을수록 AE 신호의 진폭이 커지고, D.A.R.F 값이 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 무차원 평균 거칠기 계수를 사용하여 평면 연삭가공 중에 또는 공작물을 연삭기에서 내리지 않고 인프로세스로 표면거칠기를 예측하는 것이 가능하였다.

참고문헌

1. Hasegawa, Kawamura, Ono, "The Generating Mechanism of the Ground Surface Roughness", 日本精密機械 40卷 5号, 1974, pp. 37~42
2. Honda, "Influence of Elastic and Plastic Properties of Work Materials on Ground Surface Roughness", 日本精密機械 44卷 9号, 1978, pp. 15~21
3. D.K. Bowen, M. Wormington, "Measurement of Surface Roughnesses and Topography at Nanometer Levels by Diffuse X-Ray Scattering", Annals of the CIRP Vol. 43, No. 1, 1994, pp. 497~500

4. Gert Goch, Raimund Volk, "Contactless Surface Measurement with a New Acoustic Sensor", Annals of the CIRP Vol. 43, No. 1, 1994, pp. 487~490
5. H. Trumpold, "Grinding Model Identification by Means of Surface Characterization", Annals of the CIRP Vol. 43, No. 1, 1994, pp. 479~482
6. W. Hillmann, "Surface Profiles Obtained by Means of Optical Methods", Annals of the CIRP Vol. 39, No. 1, 1990
7. N. Anbari, H. Trumpold, "The Influence of Surface Roughness in Dependence of the Probe Ball Radius with Measuring the Actual Size", Annals of the CIRP Vol. 39, No. 1, 1990, pp. 577~580
8. Nomura, Suto, Noguchi, "A Compensation Method of Profile Curves for Three Dimensional Analysis of Grinding Surfaces", 日本精密工學會誌 60卷 5号, 1994, pp. 683~687
9. EDA, KISHI, NAKAJIMA, KAKINO, " In Process Detection of the Grinding Crack by Making Use of Acoustic Emission", 日本精密機械 50卷 8号, 1984, pp. 82~87
10. INASAKI, AIDA, FUKUOKA, "Monitoring System for Cutting Tool Failure Using an Acoustic Emission Sensor", JSME International Journal, Vol. 30, No. 216, 1987, pp. 523~528
11. 윤재웅, 양민양, 박화영, "이중신호에 의한 공구파손 검출에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 16권 4호, 1992, pp. 707~722
12. E. N. Diei, D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission from the Face Milling Process", Transaction of the ASME, Vol. 109, 1987, pp. 92~99
13. 강명순, 최성주, 박 현, "2차원 절삭시 발생하는 AE에 관한연구", 대한기계학회논문집, 10권 6호, 1986, pp. 906~915

(1999년 6월25일 접수, 1999년 10월5일 채택)