

AE 신호를 이용한 연삭 가공물의 표면 거칠기 예측

곽재섭*, 송지복**

Estimation of the Ground Surface Roughness Applied by Acoustic Emission Signal

Jae Seob Kwak*, Ji Bok Song**

ABSTRACT

An in-process estimation of the ground surface roughness is a bottle-neck and an essential field in conventional grinding operation. We defined the dimensionless average roughness factor (D.A.R.F) that exhibits a roughness characteristics of ground surface. The D.A.R.F was composed easily of the absolute average and the standard deviation values which were the analytic parameters of the acoustic emission (AE) signal generated during the machining process. 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(음향방출), Grinding Operation(연삭 가공), Surface Roughness(표면 거칠기), Linear Regressive Analysis(선형 회귀분석), D.A.R.F(무차원 평균 거칠기 계수)

1. 서론

최근의 제품 생산공정에서는 정밀한 부품을 적은 비용을 들여 효과적으로 생산하기 위해 신뢰성이 우수한 자동화 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 특히 연삭 가공은 부품의 치수와 표면의 품위를 결정짓는 최종 마무리 가공으로 공작물이 연삭기에 장착된 상태에서 표면 거칠기를 자동으로 검출하는 시스템이 필요하다. 그러나 연삭 가공 기구(mechanism)의 특성상 표면 거칠기에 영향을 미치는 요인이 다양하고, 이들 사이의 정량적인 관계가 불분명하여 표면 거칠기의 정확한 예

측이 힘들어 연삭 공정의 자동화에 커다란 장애가 되고있다. 연삭 가공에서 표면 거칠기 값을 구하기 위한 이론적 해석을 얻고자하는 연구가 Ono^[1-2] 등에 의하여 이루어졌다. 이들 연구에서는 형상이 일정한 입자(숫돌 절삭날)가 숫돌면에 규칙적으로 배열되어 있다는 가정하에 절삭날이 공작물을 통과할 때의 캐적(거칠기)을 구하였으나 이는 연삭 가공의 실제와는 다르기 때문에 상당한 차이가 있었다. 다양한 측정기의 개발과 측정기술의 진보로 여러 가지 기법을 이용한 표면 거칠기의 비교 연구가 이루어 졌으나, 그 결과는 촉침(stylus)에 의한 측정방법 보다는 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다^[3-6].

* 부산대학교 대학원/기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부/기계기술연구소

그러나 측정에 의한 표면 거칠기의 측정에 있어서도 측정의 반경의 영향 및 주사 속도(scanning speed)의 문제 등 측정에 따른 다양한 문제점이 있는 것으로 나타났다¹⁷⁻¹⁸. 또한 이들 연구에서는 표면 거칠기의 측정이 가공공정 중(on-the-machine)에 직접 이루어질 수가 없어 연삭 가공 자동화를 어렵게 만드는 공통된 문제점이 있었다.

따라서 본 연구에서는 표면 거칠기의 검출과정을 연삭 가공 자동화 시스템에 포함시킬 수 있도록 평면 플런지 연삭 가공 중에 발생하는 고주파 AE(acoustic emission) 신호를 획득하고, 얻어진 신호를 컴퓨터에 저장, 데이터 분석을 통하여 표면 거칠기 특성을 나타내는 무차원 계수를 정의하였다. 계산된 무차원 계수를 선형 회귀분석기법을 통하여 표면 거칠기 예측 근사 계산식을 만들고, 이로부터 중심선 평균거칠기 값(Ra)을 기상에서 인-프로세스(in-process)로 직접 검출할 수 있음을 제안하고 그 결과를 실험을 통하여 검증하였다.

2. 표면 거칠기 특성과 AE 신호

2.1 표면 거칠기 이론

가공된 공작물의 평가는 크게 가공 치수와 표면 품위(integrity)의 두 가지 관점에서 생각할 수 있다. 가공치수는 가공물의 미시적 관점에서 본 크기를 나타낸 것이고, 표면 품위는 표면 층의 기계적, 금속학적인 변화, 그리고 표면 거칠기 등을 포함한다.

일반적으로 공작물의 전체적인 모양을 넓은 의미로 형상(form)이라 하고, 그 형상 내에서 공작물의 비교적 넓은 영역에 걸쳐 나타나는 저주파의 굴곡을 파상도(waviness), 그리고 파상도 내에서 아주 짧은 구간에서 나타나는 고주파의 높이변화가 표면 거칠기(surface roughness)이며 이들 사이의 관계는 Fig. 1과 같다.

연삭 가공에서 얻어지는 중심선 표면 거칠기(Ra)의 이론식은 다음과 같이 주어진다¹⁹.

$$Ra = \frac{1}{9\sqrt{3}} \left(\frac{v_w \cdot a}{v_s \cdot d^{1/2}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, v_s 와 v_w 는 스톨의 원주속도와 공작물의 속도이고, d 와 a 는 각각 스톨의 직경과 스톨

외주면에 분포한 절삭 입자들의 평균 간격이다. 표면 거칠기의 측정은 일반적으로 측정식 조도계를 이용하고, 정량적인 평가를 위해 충분한 표본수를 획득할 수 있는 샘플 길이를 선택한다. 연삭 가공과 같은 다듬질 가공된 표면의 거칠기 측정에 사용되는 샘플 길이는 0.8mm 정도가 일반적이다.

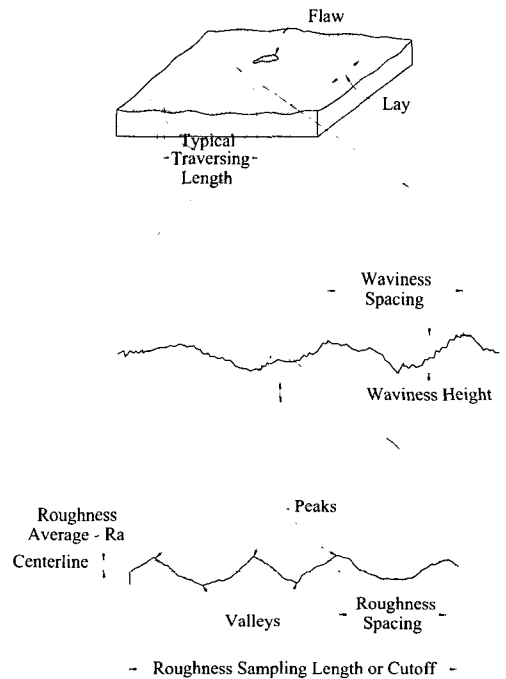


Fig. 1 Description of Surface Roughness

2.2 AE 신호와 그 특성

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나게 되면 재료 내부에 축적되어 있던 변형 에너지는 파면형성 에너지, 열 에너지, 격자변형 에너지 그리고 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이 중에서 외부에서 계측장치에 의해서 가시적으로 검출된 탄성파가 AE 신호이다.

이와 같은 AE 신호를 가공공정의 감시(monitoring)에 이용하는 가장 큰 이유는 AE 신호는 주파수 대역이 대략 100~800kHz의 고주파로 저주파 영역의 잡음(noise)을 효과적으로 제거하

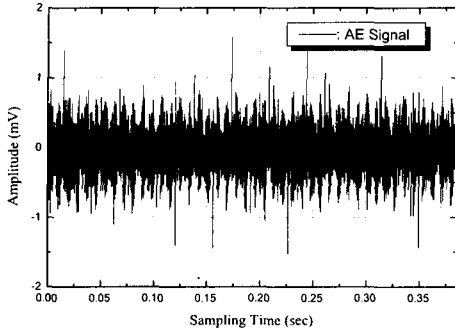


Fig. 2 AE Signal Measured in Grinding Operation.

면 신뢰성 있는 감시시스템을 구성할 수 있기 때문이다^{[10],[11]}. 그러나 주파수가 높기 때문에 신호를 얻기 위해서는 고속처리가 가능한 고가의 DSP 보드가 필요하다는 난점이 있어서, 일반적으로 원 신호(raw signal)를 획득하지 않고 변조의 방법을 이용하거나 RMS 처리된 신호를 얻어서 감시시스템을 구성하고 있다^[12]. Fig. 2는 연삭 가공에서 얻어진 AE 신호를 나타낸다.

본 연구에서는 예비실험을 통하여 연삭 가공 중에 발생하는 AE 신호의 진폭과 신호특성이 변함에 따라서 표면 거칠기 값이 변하는 것을 확인하고 이로부터 인프로세스로 근사적인 표면 거칠기 값의 예측을 시도하였다.

3. AE 신호와 표면 거칠기의 상관관계

3.1 장치의 구성과 실험 조건

본 연구에서는 WA60K7V, 외경 228mm, 폭 24mm의 슛돌로 난삭재 금형강 인 STD11과 STD61을 마그네틱 척에 고정하여 평면 연삭을 하였고, 가공 중에 AE 신호를 효과적으로 얻을 수 있도록 AE 센서를 공작물의 측면에 부착하였다. 드레싱은 초기에 1회만 수행하였고, 이후는 드레싱을 하지 않았다. 실험에 사용된 실험장치의 구성도는 Fig. 3과 같으며 각 장비의 사양은 Table 1에 나타내었다.

가공 중에 발생하는 AE 신호는 잡음에 강한 차동형 광대역 센서로 검출하여, 주파수 범위가 100~1200kHz의 내장형 대역통과 필터를 거친 신

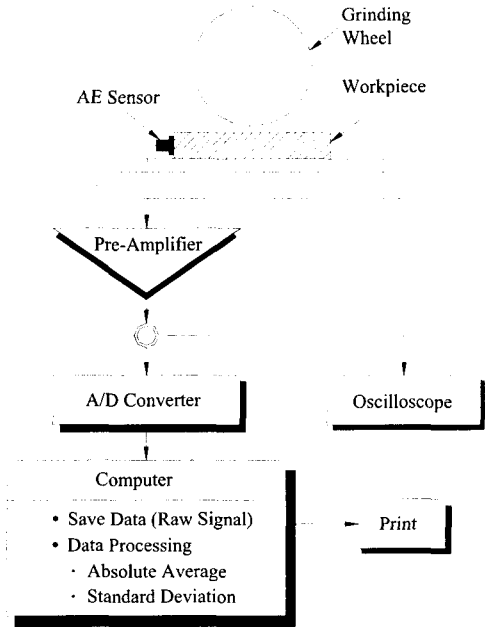


Fig. 3 Experimental Status for Signal Acquisition

Table 1 Specifications of Equipments

Items	Type & Features
Grinder	Spindle Speed : 2800 rpm Spindle Motor : 0.75 Kw
AE Sensor	SN A-82 Wide Band
Pre-Amplifier	Physical Acoustic Co. 1220A 40/60 db Selective Gain
Oscilloscope	Hitachi Denshi, VC-6023 2 Channel Digital Storage
A/D Converter	12 Bits A/D Resolution
Computer	Pentium-300MHz

호가 감소 되는 것을 방지하기 위해 프리 앰프(pre-amplifier)를 사용하여 40db로 증폭하였다. 검출되는 신호의 변화 거동을 관찰하기 위하여 오실로스코프(oscilloscope)로 신호를 시각화하였고, 12비트의 분해능을 갖는 A/D 변환기를 사용하여 얻

어진 데이터를 컴퓨터에 저장, 표면 거칠기와의 상관계수를 구하기 위하여 신호분석을 실시하였다. 이때 사용된 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental Conditions

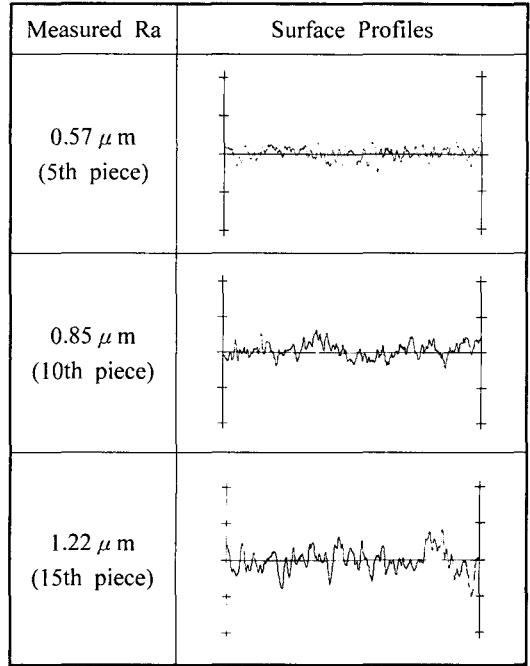
Items	Experimental Conditions
Wheel Velocity, Vs	1320 m/min
Workpiece Velocity, Vw	5, 10, 20 m/min
Depth of Cut, h	5, 10, 15 μ m
Coolant	Not Used
Cutting Method	Down Cut

3.2 AE 신호와 표면 거칠기의 상관관계

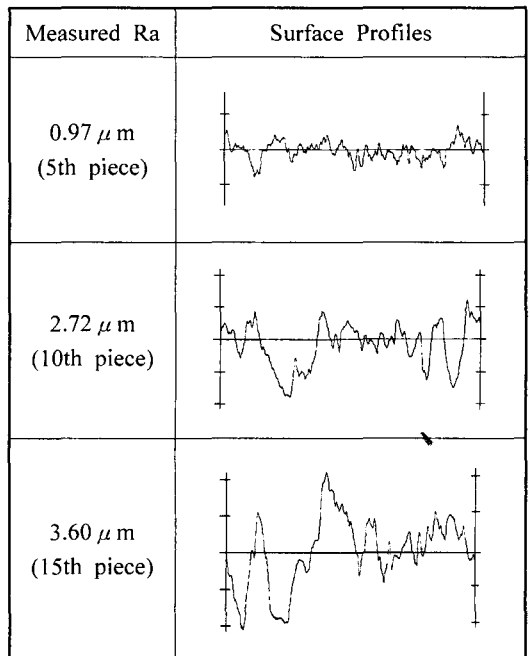
Fig. 4는 소재 STD11과 STD61을 사용, 연삭가공 회수의 증가에 따른 공작물 표면 거칠기를 표시한 것이다. STD11과 STD61 모두 가공회수가 증가함에 따라서 표면 거칠기 값이 증가함을 알 수 있다.

표면 거칠기와 AE 파라메타의 직접적인 연관성을 알아보기 위해 실험을 하였다. AE 파라메타로는 AE 신호의 진폭 변화를 의미하는 절대평균(absolute average)과 AE 신호의 평균값에 대한 흠어짐(산포)의 정도를 나타내는 표준편차(standard deviation)를 이용하였고, 실험결과는 Fig. 5와 같다. 가공회수의 증가에 따라서 표면 거칠기는 거의 선형적으로 증가하고 있으나, 절대평균과 표준편차의 변화는 비선형적인 변화를 보여주고 있다. 그러므로 AE 신호의 절대평균과 표준편차를 사용하여 직접적으로는 표면 거칠기를 구하는 것이 불가능함을 알 수 있다. 따라서 표면 거칠기를 예측하기 위해 AE 신호의 두 파라메타로 구성되는 무차원 표면 거칠기 계수(dimensionless average roughness factor, D.A.R.F)를 다음과 같이 정의하여, 표면 거칠기와의 간접적인 상관관계의 규명을 시도하였다.

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



(a) STD11



(b) STD61

Fig. 4 Roughness Profiles of the Ground Surface

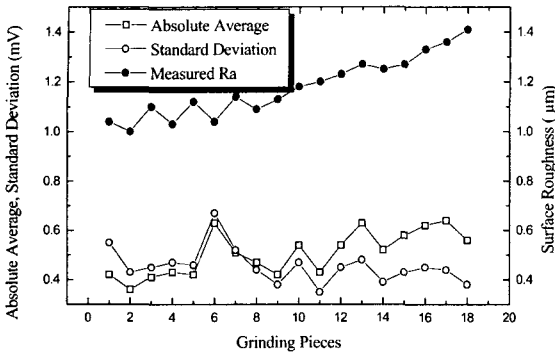


Fig. 5 Variation characteristics of AE parameters and measured surface roughness

여기서 n 은 데이터의 개수, x_i 는 획득된 AE 신호 값, \bar{x} 는 AE 신호의 평균값을 나타낸다.

무차원 표면 거칠기 계수 D.A.R.F는 가공 회수의 증가에 따른 AE 신호의 진폭변화(absolute average)와 중심값에 대한 산포(standard deviation)의 변화 비를 의미한다.

3.3 D.A.R.F와 표면거칠기의 상관관계

실험을 통하여 AE 신호로부터 구한 D.A.R.F와 가공된 공작물을 스타일러스로 측정된 표면 거칠기의 상관관계를 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다.

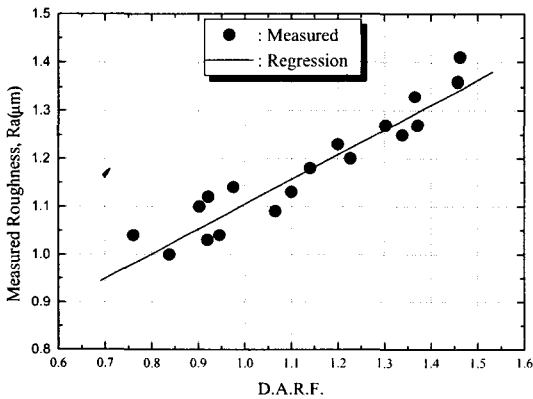


Fig. 6 Surface Roughness versus D.A.R.F in STD11

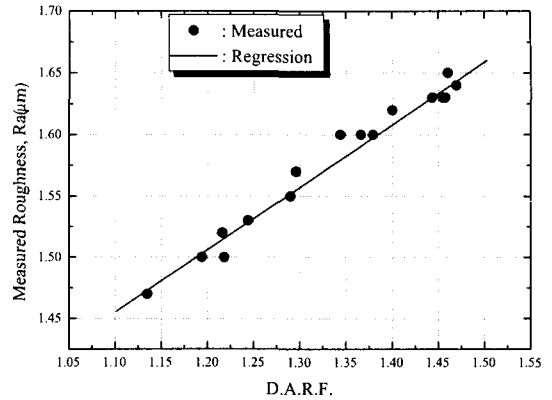


Fig. 7 Surface Roughness versus D.A.R.F in STD61

Fig. 6과 7에서와 같이 D.A.R.F 값이 증가함에 따라서 표면 거칠기 값은 거의 선형적으로 증가하였다. 따라서 표면 거칠기와 AE 신호의 D.A.R.F 값 사이의 상관관계는 최소자승법(least square method)을 이용하여 1차 선형 회귀식으로 나타낼 수 있다.

구해진 1차 선형 회귀식을 이용하면, 가공 중에 AE 신호를 획득하여 D.A.R.F를 계산하고, 이것을 회귀식에 적용하면 연삭 가공 중에 표면 거칠기 값을 온라인(on-line)으로 예측하는 것이 가능해진다. 공작물 STD11과 STD61의 회귀식은 각각 식(3), (4)와 같다.

$$Ra = 0.586 + 0.517 \times D.A.R.F \quad (3)$$

$$Ra = 0.894 + 0.509 \times D.A.R.F \quad (4)$$

두 회귀식을 살펴보면 회귀식의 기울기는 유사하나, 상수항에서는 STD61이 STD11 보다 150% 정도의 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 연삭 가공에서 STD11과 STD61인 재료가 같은 D.A.R.F 값을 가질 때 표면 거칠기 값은 STD61이 STD11 보다 더 크다는 것을 의미하고, 이것은 경도가 높은 공작물일수록 동일한 조건에서도 표면 거칠기 값이 크게 나타남을 의미한다. 또 AE 신호에 있어서는 경도가 높은 공작물일수록 AE 신호의 표준편차 값보다는 신호의 진폭(절대평균)이 급격히 증가하여 D.A.R.F 값이 커지는 것을 의미한다.

4. 표면 거칠기 예측 및 고찰

식(3)과 (4)에서 구해진 회귀식을 표면 거칠기 예측 프로그램에 삽입하여 연삭기의 척에 공작물이 고정되어 가공되고 있을 때 공작물의 표면 거칠기 값의 온 라인(on-line) 예측을 시도하였다. 회귀식의 유효성을 평가하기 위해서 실험조건인 테이블 속도와 절입깊이는 랜덤하게 설정하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 STD11과 STD61 인 공작물의 가공에서 AE 신호의 D.A.R.F로부터 예측된 표면 거칠기 값과 스타일러스로 측정된 값을 나타내고 있다.

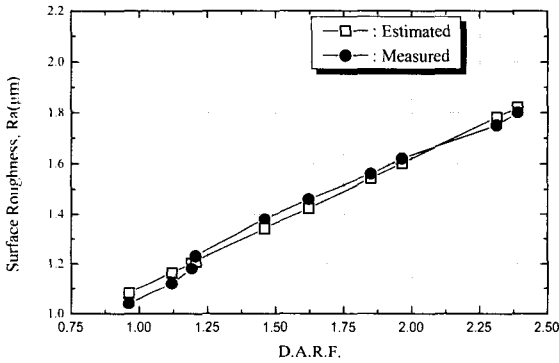


Fig. 8 Estimated Results of Surface Roughness in STD11

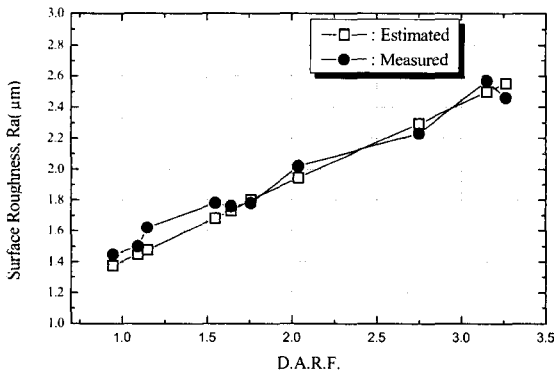


Fig. 9 Estimated Results of Surface Roughness in STD61

또한 예측된 표면 거칠기 값과 측정된 값의 차를 정량적으로 나타내기 위해 오차율을 식 (5)와 같이 정의하였다.

Error Rate(%)

$$= \frac{|E(Ra) - M(Ra)|}{M(Ra)} * 100 \quad (5)$$

여기서 M(Ra)는 측정된 표면 거칠기 값이며, E(Ra)는 D.A.R.F를 이용해 예측된 표면 거칠기 값이다. 구해진 오차를 Table 3과 4에 나타내었다.

Table 3 Calculation of Estimated Error Rate in STD11

STD11		
Estimated Ra	Measured Ra	Error (%)
1.083	1.04	4.1
1.164	1.12	3.9
1.202	1.18	1.9
1.210	1.23	1.6
1.341	1.38	2.8
1.424	1.46	2.5
1.543	1.56	1.1
1.602	1.62	1.1
1.781	1.75	1.8
1.821	1.80	1.2

Table 4 Calculation of Estimated Error Rate in STD61

STD61		
Estimated Ra	Measured Ra	Error (%)
1.376	1.45	5.1
1.450	1.50	3.3
1.478	1.62	8.7
1.682	1.78	5.5
1.73	1.76	1.7
1.80	1.78	1.1
1.931	2.02	4.4
2.295	2.23	2.9
2.498	2.57	2.8
2.554	2.46	3.8

Table 3과 4에서 오차율의 크기는 대체로 5% 미만의 매우 작은 값으로 나타났고, 최대 오차율이 8.7% 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다.

연삭 가공된 공작물의 표면 거칠기 값은 측

정부위에 따라 약간의 변동이 있기 때문에, 서브 마이크로미터(sub-micrometer) 단위의 오차 범위 내에서 인프로세스로 표면 거칠기를 근사 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

- (1) 가공 중에 발생하는 AE 신호로부터 절대평균과 표준편차 값으로 구성되는 D.A.R.F를 정의하고 표면 거칠기와 D.A.R.F가 상관관계가 있음을 규명하여 이를 바탕으로 근사적인 표면 거칠기를 가공 중(on-the-machine)에 검출할 수 있었다.
- (2) 가공표면의 실측치와 예측치의 차이는 (5)% 이내 임으로 작업현장에서 활용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Hasegawa, Kawamura, Ono, "The Generating Mechanism of the Ground Surface Roughness," 日本精密機械 40卷 5号, pp. 37~42, 1974.
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, pp. 15~21, 1978.
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, pp. 497~500, 1994.
4. G. Goch, R. Volk, "Contactless Surface Measurement with a New Acoustic Sensor,"

- Annals of the CIRP Vol. 43, No. 1, pp. 487~490, 1994.
5. H. Trumpold, "Grinding Model Identification by Means of Surface Characterization," Annals of the CIRP Vol. 43, No. 1, pp. 479~482, 1994.
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, pp. 577~580, 1990.
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, pp. 683~687, 1994.
9. S. Malkin, "Grinding Technology-Theory and applications of machining with abrasives," John Wiley & Sons, 1989.
10. 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, pp. 82~87, 1984.
11. Inasaki, Aida, Fukuoka, "Monitoring System for Cutting Tool Failure Using an Acoustic Emission Sensor," JSME International Journal, Vol. 30, No. 216, pp. 523~528, 1987.
12. E. N. Diei, D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission from the Face Milling Process," Transaction of the ASME, Vol. 109, pp. 92~99, 1987.