

〈論 文〉

# 표면 거칠기 광산란 패턴의 컴퓨터 수치 분석(Ⅰ)

임동열\* · 김승우\*\*

(1991년 9월 27일 접수)

## Numerical Analysis of Light Scattering Patterns for Measurement of Roughness( I )

Dong-Yeol Yim and Seung-Woo Kim

**Key Words:** Numerical Analysis(수치분석), Light Scattering Pattern(또는 Scattered Pattern)(광산란 패턴), Beckmann's Light Scattering Theory(벡만의 광산란 이론), Intensity of Scattered Light(산란광의 강도), Roughness(표면거칠기 또는 거칠기), Roughness Profile(거칠기 단면곡선), Sinusoidal Surfaces(정현파 표면), Turned Surfaces(선삭 표면), Normal Surfaces(정규분포 표면), Ground Surfaces(연삭 표면), Lapped-like Surfaces(래핑류 표면)

### Abstract

This paper describes a numerical analysis of the light scattering patterns of roughness profiles. This analysis was based upon the light scattering theory developed by Beckmann. In the analysis, the roughness profile was regarded as a profile whose irregularities depend on the production process and the shape of cutting tool. Generally, waviness of an actual surface seriously distorts the scattered pattern of roughness profile. In order to avoid the effects of waviness of actual surfaces, several theoretically calculated scattering patterns, instead of actual scattering patterns, were used to analyze the scattering patterns of typical engineering roughness profiles. The characteristics of the light scattering patterns for five model surfaces were studied.

### 기 호 설 명

$C, K$	: 산란기하에 의해 결정되는 상수	$I(\theta_{2m})$	: 반사각 $\theta_{2m}$ 방향의 반사광강도 크기
$c$	: 상수	$I_n(\theta_2)$	: 반사각 $\theta_2$ 방향의 규격화된(normalized) 반사광강도 크기
$d$	: 미분 기호	$i$	: 복소수를 나타내는 기호
$C(\tau)$	: 자기상관함수 (autocorrelation function)	$j$	: 인덱스(index)
$F$	: 선삭 표면의 이송거리(feed)	$J_m$	: $m$ 차 제 1종 Bessel 함수
$g$	: $R_q$ 와 $\nu_z$ 에 의해 결정되는 변수	$L$	: 입사광길이의 절반
$H$	: 정현파 표면의 진폭(amplitude)	$m$	: 임의의 정수
$I(\theta_2)$	: 반사각 $\theta_2$ 방향의 반사광강도(light intensity) 크기	$N$	: 표면 이산데이터(discrete data)의 수
		$n$	: $(L/F)$ 의 정수부
		$\vec{n}$	: 표면의 반사평면의 법선벡터(normal vector)

\*정회원, 한국표준과학연구원 길이연구실

\*\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

- $\vec{r}$  : 반사점의 위치벡터 (position vector)
- $R_a$  : 중심선 평균 거칠기
- $R_q (= \sigma)$  : R.M.S. (root mean square) 거칠기
- $R_{sk}$  : 비대칭도 (skewness)
- $R_{ku}$  : 뾰족도 (kurtosis)
- $R_n$  : 단인공구의 인선반경 (tool nose radius)
- $T$  : 주기표면의 주기
- $T_c$  : 확률표면의 상관거리 (correlation distance)
  
- $x$  : 표면의 수평방향 좌표
- $\Delta x$  : 표면의 샘플링 간격
- $z(x)$  :  $x = j\Delta x$ 에서의 표면높이
- $z(x)$  : 표면의 높이방향 좌표 및 표면돌기의 높이
- $\lambda$  : 입사광의 파장 (wavelength)
- $\vec{v}$  : 전자파벡터의 조합으로 구성되는 벡터
- $v_x, v_z$  :  $\vec{v}$ 의  $x$  및  $z$ 방향 성분
- $\theta_1$  : 입사각도
- $\theta_2$  : 반사각도
- $\theta_{2m}$  : 주기표면의 산란패턴에서 산란돌기들 (intensity peaks)이 생성되는 반사각도

### 1. 서 론

공학표면의 인프로세스 (in-process) 측정이나 온라인 (on-line) 측정을 위해 활발히 연구되어온 비접촉식 광산란 (light scattering) 방법은 일부의 응용분야에서는 성공적으로 도입되고 있는 것으로 보고되고 있다<sup>(1-10)</sup>. 그러나 기계공학 분야에서 널리 사용되는 표면들에 대해 일반적으로 응용되지는 못하고 있는 실정이다. 그 근본적인 이유는 광산란 방법의 본질적 특성 때문이다<sup>(11-12)</sup>.

광산란방법은 표면에서의 빛의 산란현상을 이용하는 방법으로 비교적 간단한 측정구조와 빠른 측정속도를 갖는다는 장점이 있다. Fig. 1은 광산란 방법의 기본적인 측정원리를 도시한다. 가장 기본적인 응용원리는 표면이 고울수록 산란 (scattering)이 작아져서 반사광들이 정반사 (specular reflection) 방향으로 집중되고, 표면이 거칠수록 위와는 반대로 산란이 커져서 난반사 (diffuse reflection) 방향으로 분산되는 현상이다. 이 현상을 이용하여 산란패턴 (scattered pattern)을 분석하고 표면거칠기를 산출한다.

광산란방법의 본질적 특성이 갖는 응용의 한계성

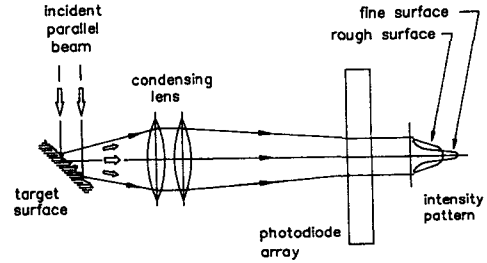


Fig. 1 Basic principle of light scattering method

은 광산란현상과 표면거칠기 사이에 일대일 대응관계가 성립되기 위해서는 표면의 미세형상에 관한 정보가 요구된다는 원리적인 점에 있다. 이는 실제적으로 표면을 생성시키는 가공모델에 따라 산란패턴의 해석방법이 달라지게 됨을 의미하며, 가공모델을 고정시켜서 산란패턴을 해석할 것이 요구된다.

본 연구에서는 기계공학 분야에서 널리 사용되고 있는 대표적인 공학표면들에 대해 컴퓨터 수치분석 방법을 이용하여 산란패턴을 생성하고 패턴의 특성을 파악하고자 하였다. 표면거칠기가 표면생성에 사용된 공구와 공정의 복제로 간주되기 때문에 이러한 이론적인 접근방법은 간편하고 유용한 수단을 제공할 것이다. 실제의 표면에는 거칠기 이외에도 파상도 (waviness)가 중첩되어 있기 때문에 실험적인 광산란 측정을 통해서는 거칠기 단독의 산란패턴을 얻기가 매우 어려운 점이 있다. 또, 실제 표면의 거칠기 단면 곡선 (roughness profile)은 이론적인 모델형상과는 차이가 있기 때문에 가공모델에 따른 산란패턴의 기본적 특성파악을 위해서는 이와 같은 이론적인 방법이 효과적이다.

### 2. BECKMANN의 광산란 이론

광산란이론은 기본적으로 입사광이 표면에서 반사될때 반사공간상의 한점의 전기장의 세기와 해당 표면의 표면돌기들의 특성 사이의 관계를 연결지어 주는 이론이다. 이 이론은 Helmholtz와 Kirchhoff의 적분정리에 따르면 원리적으로는 표면 바로 위의 전기장과 전기장의 수직도함수 (normal derivative)만 주어지면 완전히 결정되는 경계값 문제이다<sup>(12,14)</sup>. 그러나, 아직까지는 거친 표면에서의 빛의 반사과정이 완전하게 알려지지 않기 때문에 표면의 특성과 전기장의 세기 사이의 관계가 엄밀하게

구해지지 않는다. 따라서 표면과 전기장 사이의 관계를 위해 반사과정에 몇 개의 가정들을 도입하게 된다<sup>(13)</sup>. 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되며 거칠기 측정의 응용에 가장 적합한 것으로 알려진 Kirchhoff 근사와 그에 기초한 Bec-kmann의 산란 이론<sup>(14)</sup>을 이용한다.

Beckmann의 산란이론에 근거한 방법에서는 입사광속이 표면에 입사되어 반사될 때 원거리회절 영역(fraunhofer zone of diffraction)에서의 광강도(light intensity)를 이용하여 표면거칠기를 산출한다. 따라서 산란광이 평면파(plane wave)로 간주 될 수 있으며 반사방향에 따른 산란광의 광강도 분포 패턴, 즉 산란패턴(scattered pattern)과 표면 거칠기 사이의 관계가 비교적 용이하게 유도될 수 있다. Fig. 2는 Kirchhoff 근사의 산란기하(scattering geometry)를 나타낸다. 그림에서 단면곡선(surface profile)의 높이  $z(x)$ 로 평균값은 0이며, 입사광은 단일파장  $\lambda$ 의 균일한 강도 분포를 갖는 선형편광 평면파광속(linearly polarized light beam)으로 간주된다. 이제 표면돌기들(surface irregularities)의 곡률반경이 입사광의 파장  $\lambda$ 에 비해 충분히 커서 광파의 전기장장이 Fig. 3과 같이 반사점의 접평면(tangential plane)에 존재하는 경우를 가정하자. 다중산란(multiple scattering)과 그림자효과(shadowing effects)를 무시하면 반사각도  $\theta_2$  방향의 산란광의 광강도  $I(\theta_2)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$I(\theta_2) = \left| KC \left| \int_{-L}^L \text{Exp}(i\vec{\nu} \cdot \vec{r}) dx \right|^2 \right. \quad (1)$$

여기서

$$\begin{aligned} \vec{\nu} \cdot \vec{r} &= \nu_x x + \nu_z z(x) \\ &= (2\pi/\lambda) \{ (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) x \\ &\quad - (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) z(x) \} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)에서 적분항은 반사방향에 따른 산란광의 위상변화(phase shift) 효과가 산란광의 광강도에 미치는 영향을 나타내며, 앞의 계수항 KC는 표면의 반사율에 따른 에너지손실 효과와 반사각에 따른 에너지분배 효과가 광강도에 미치는 영향을 나타낸다. 따라서 이상의 광산란이론은 표면의 반사율이 주어졌을 때 측정된 광강도  $I(\theta_2)$ 로부터 적분값을 구할 수 있게 하고, 표면의 특성에 관한 정보의 도움으로 거칠기를 산출할 수 있게 한다.  $\theta_2$ 에 따른  $I(\theta_2)$ , 즉 산란패턴을 측정하여  $z(x)$ 의 함수인 표면거칠기  $R_a$ 나  $R_q$ 를 산출하는 것은 수학적으로는 적분방정식의 해를 구하는 것으로 볼 수 있다. 여기서 적분항이  $z(x)$ 의 함수로 주어지기 때문에 적분방정식의 해를 구하기 위해서는  $z(x)$ 의 미세형상에 관한 정보를 필요로 한다<sup>(12)</sup>.

### 3. 산란 패턴의 수치 분석

본 장에서는 Fig. 4에 도시된 바와 같은 5가지의 대표적인 공학표면들에 대한 산란특성을 조사하기 위해 수행된 컴퓨터 수치분석과 그 결과에 대해 기술한다. 본 수치분석에서는 각 공학표면들에 대한 산란패턴의 특성들이 해당 표면의 거칠기를 결정짓는 인자들과 어떤 관련을 가질 것인가에 관심이 집중되었다. 분석의 대상으로 삼은 표면은 정현파표면(sinusoidal surfaces), 선삭표면(turned surfaces), 정규 분포표면(normal surfaces), 연삭표면(ground surfaces), 래핑류표면(lapped-like surfaces)의 5가지 표면이다. 여기서 정현파표면과 선삭표면은 주기표면으로 분류될 수 있고 정규분포 표면 연삭표면, 래핑류표면은 확률표면으로 분류될 수 있다. 또, 정현파표면과 정규분포 표면은 대표적인 이론 표면이고 나머지 3표면은 대표적인 실제 가공 표면이다. 실제 가공표면에는 매우 다양한 많은 표면들이 있으나 본 연구에서는 산란특성에 대한 정성적 고찰의 입장과 산란패턴의 특징상의 관점에서 가장 전통적인 가공표면으로 간주될 수 있

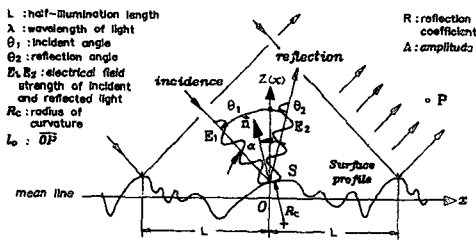


Fig. 2 Scattering geometry

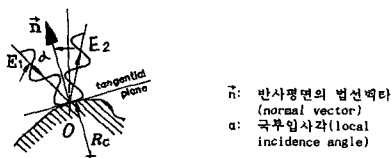


Fig. 3 Kirchhoff approximation

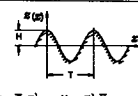
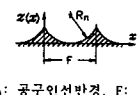
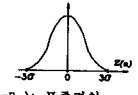
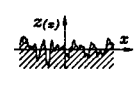
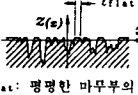
구분	단면곡선	특성변수
주 기 표 면	 <p><math>z(x)</math> T: 주기, H: 진폭</p>	표면: T, H $R_a = 2H/\pi$ 패턴: T, H
표 면	 <p><math>z(x)</math> <math>R_a</math> F  <math>R_a</math>: 공구인선반경, F: 이송</p>	표면: $R_a, F$ $R_a \propto F^2 / (18\sqrt{3}R_a)$ 패턴: $R_a, F$
확 률 표 면	 <p><math>\omega(z)</math> -3<math>\sigma</math> 0 3<math>\sigma</math>  <math>\sigma (=R_q)</math>: 표준편차  <math>\omega(z)</math>: 확률밀도 함수  <math>T_c</math>: 상관거리</p>	표면: $R_q, T_c, R_{sk}$ (skewness), $R_{ku}$ (kurtosis) 패턴: $R_q, T_c$
비 정 규 (non-gaussian) 확 률 표 면	 <p><math>z(x)</math></p>	표면: $R_q, R_{sk}, R_{ku}, C(\tau)$ : Autocorrelation function 패턴: $R_q, T_c$
래 핑 류 (lapped-like) 표 면	 <p><math>z(x)</math> <math>l_{flat}</math>  <math>l_{flat}</math>: 평평한 마무부의 길이</p>	표면: $R_q, R_{sk}, R_{ku}$ 패턴: $R_q$ 또는 $\sum l_{flat}$

Fig. 4 Numerically analyzed 5 profiles

는 5가지 표면을 대상으로 하였다.

산란방정식을 이용하여 산란광강도를 구하기 위해서는 적분항의 값을 얻어야 되는데, 이 적분은 정현파표면이나 정규분포표면 등과 같이 산란방정식이 이론적으로 주어지는 표면을 제외하고는  $z(x)$ 를 이용하여 직접 수행하여야 한다. 실제의 공학표면들에 대한  $z(x)$ 는 측정식적절기 측정기를 이용하여 측정되었는데, 이 경우에는  $z(x)$ 가 이산데이터(discrete data) 형태이기 때문에 본 연구에서는 다음과 같이  $x$ 에 대한 연속적분을 부분적분의 합으로 대체시켜서 적분을 수행하였다.

$$\int_{-L}^L \text{Exp}\{i\nu_z z(x) + i\nu_x x\} dx \approx \sum_{j=-N}^{N-1} \int_{j\Delta x}^{(j+1)\Delta x} \text{Exp}\{i\nu_z z(x) + i\nu_x x\} dx \quad (3)$$

여기서  $\Delta x$ 는  $z(x)$ 의 이산데이터 사이의 간격이며  $N$ 은 길이  $L$  사이의 데이터 수로 다음과 같이 주어진다.

$$L = N\Delta x \quad (4)$$

식 3에서 미소간격  $\Delta x$  사이의 적분은 사다리꼴 법칙을 이용하여 다음과 같이 수행하였다.

$$\int_{j\Delta x}^{(j+1)\Delta x} \text{Exp}\{i\nu_z z(x) + i\nu_x x\} dx$$

$$= 0.5\{\text{Exp}[i\nu_z z(j) + i\nu_x j\Delta x] + \text{Exp}[i\nu_z z(j+1) + i\nu_x (j+1)\Delta x]\} \quad (5)$$

이 방법에 있어서 적분의 오차는  $\Delta x$ 의 크기에 의존하는데 본 연구에서는 대략  $1\mu m$  정도로 취해졌으며, 적분의 수렴성은 정현파표면(sinusoidal surface)에 대해 Bessel 함수로 표현되는 산란방정식을 이용한 결과와 비교하는 방법으로 입증되었다. 적분의 길이  $2L$ 은  $4.0mm$ 로 취해졌는데 이는 측정식방법이 표면거칠기를 산출할 때 가장 일반적으로 취하게 되는 평가길이이다. 측정식의 평가길이는 광산란방법의 적분길이에 해당되나, 광산란방법의 경우에는 규격이 정해져 있지 않기 때문에 본 연구에서는 측정식에 준하여 적분길이를 정했다<sup>(15)</sup>.

이 수치적분은 Kirchhoff 근사의 조건을 만족한다는 가정 아래 입사각  $\theta_i$ 를  $0^\circ$ 로 하고 입사광의 파장  $\lambda$ 를  $0.8\mu m$ 로 하여 수행되었다. 입사각은 산란패턴의 해석상 편리를 위해 대칭형 산란패턴이 얻어지는  $0^\circ$ 로 하였다. 파장은 레이저 다이오드(laser diode)가 광원으로 사용되는 경우를 가정하여 결정하였다. 산란광은 다음과 같이 규격화된(normalized) 형태의 광강도  $I_n(\theta_2)$ 로 표현되었다.

$$I_n(\theta_2) = I(\theta_2) / |2LKC|^2 \quad (6)$$

여기서  $2L$ 은 적분구간이며  $KC$ 가 계수항이기 때문에  $I(\theta_2)$ 대신  $I_n(\theta_2)$ 를 다루어도 패턴의 특성에는 변화가 없다. 식 (6)은 물리적으로는 표면돌기들에 의해 산란광에 가해진 위상변화(phase shift) 효과의 평균을 의미한다.

### 3.1 정현파 표면(sinusoidal surfaces)

정현파표면은 Fig. 4에 도시된 바와 같이 주기  $T$ 와 진폭  $H$ 의 두 변수로 묘사될 수 있으며, 한 주기 내의 표면거칠기는  $R_a = 2H/\pi$ 로 진폭  $H$ 만의 함수이다. 정현파 표면은 주기표면이기 때문에 특정한 반사각  $\theta_{2m}$ 에서는 산란광들이 동위상(in-phase)에 있게되며 산란패턴상에 산란돌기들(intensity peaks)을 생성시킨다. 이 산란돌기들의 광강도  $I(\theta_{2m})$ 은 Bessel 함수를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(\theta_{2m}) = |2LKC(-i)^m J_m(\nu_z)|^2 \quad (7)$$

$$\theta_{2m} = \sin^{-1}(\sin\theta_1 - m\lambda/T) \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (8)$$

식 (7)에서  $J_m$ 은  $m$ 차 제 1종 Bessel 함수이다.

Fig. 5는 전형적인 정현파표면의 산란패턴들을 도시하는데 단면곡선을 묘사하는  $T$ 와  $H$ 의 두 가지 변수에 대해 산란패턴의 형태가 어떻게 변화하는가를 보여준다. 그림에서 왼쪽 열(column)은

주기  $T$ 가 일정하게 유지되면서 진폭  $H$ 가 변화하는 경우를 나타내며, 오른쪽 열은 반대로 진폭이 일정하게 유지되면서 주기가 변화하는 경우를 나타낸다. 이들 산란패턴의  $T$ 와  $H$ 의 변화에 대한 전체적인 특징은 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 다

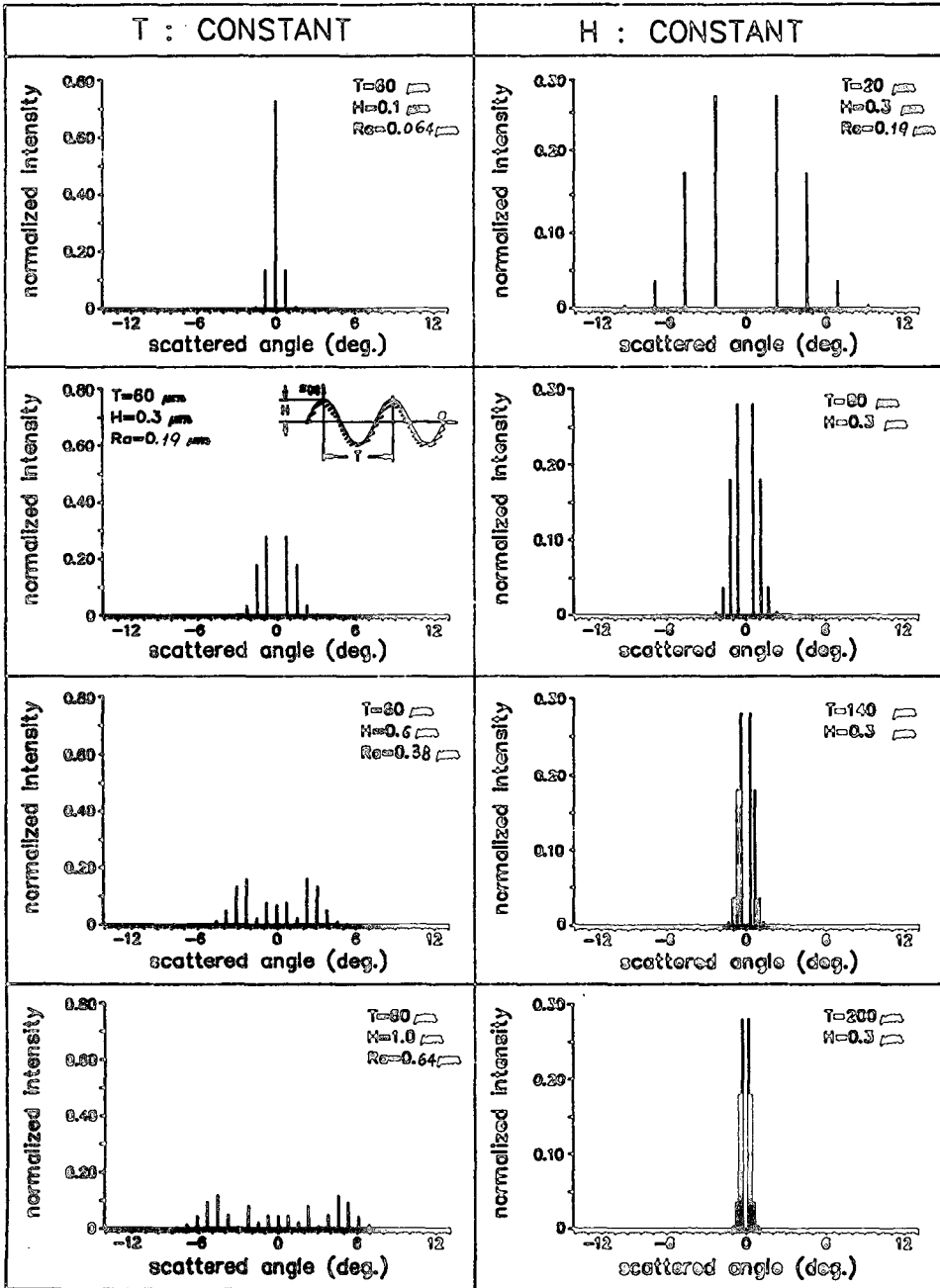


Fig. 5 Scattered patterns of sinusoidal profiles

음의 두가지로 요약된다.

(1) 진폭  $H$ 와 주기  $T$ 가 산란패턴에 미치는 영향은 독립적으로 취급될 수 있으며,  $T$ 가 일정하게 유지될 때  $H$ 의 변화는 산란패턴 자체, 즉 산란돌기들의 크기 및 공간상의 배치상태의 변화를 유발시킨다.

(2)  $H$ 가 일정하게 유지될 때  $T$ 의 변화는 산란패턴 자체의 변화를 유발시키지는 않으나 산란돌기들 사이의 각도 간격의 변화를 유도한다.

### 3.2 선삭 표면(turned surfaces)

선삭에서는 바이트(bite)의 형태와 설치각도에 따라 다양한 형태의 표면이 생성될 수 있는데, 본 연구에서는  $R$ 형 바이트를 이송방향에 대해  $90^\circ$ 로 설치한 경우를 가정하였다. 이 표면에서는 한 주기 내의 표면형태가 대칭이기 때문에 대칭형의 산란패턴을 보인다. 이 경우에 공구의 인선반경  $R_n$ 이 입사광의 파장  $\lambda$ 에 비해 충분히 크고, 이송(feed)  $F$ 가  $2R_n$ 보다 크면 제 2장의 가정을 만족하는 것으로 간주될 수 있다. 선삭표면은 이송  $F$ 의 주기표면이기 때문에 정현파 표면에서와 같이 반사각  $\theta_{2m}$ 에서 산란패턴상에 산란돌기들이 생성된다. 이때 산란돌기들의 광각도  $I(\theta_{2m})$ 은 근사적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(\theta_{2m}) \cong 4n^2 \left| KC \int_0^F \text{Exp}(i\vec{\nu} \cdot \vec{r}) dx \right|^2 \quad (9)$$

$$\theta_{2m} = \sin^{-1}(\sin \theta_1 - m\lambda/F) \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (10)$$

여기서  $n$ 은  $(L/F)$ 의 정수부이다.

이 표면에 대한 산란패턴의 전형적인 형태는 Fig. 6에 도시된 바와 같은데 그림에서 왼쪽 열은 이송  $F$ 가 일정하게 유지되면서 인선반경  $R_n$ 이 변화하는 경우이고, 오른쪽 열은 반대로 인선반경이 일정하게 유지되면서 이송이 변화하는 경우이다. 이들 산란패턴은 그림에서 볼 수 있는 바와 같이  $F$ 와  $R_n$ 을 변수로 하여 전체적으로 다음과 같이 변화하는 특성을 보인다.

(1) 이송  $F$ 를 일정하게 유지할 때  $R_n$ 의 변화는 산란패턴의 기본형태는 그대로 유지하면서 패턴을 전체적으로(가로 및 세로로) 확대시키거나 축소시킨다.

(2) 인선반경  $R_n$ 을 일정하게 유지시킬 때  $F$ 의 변화는 패턴 자체를 변화시킨다.

이 표면에 있어서 이송  $F$ 는 정현파 표면의 주기  $T$ 와 동일하므로 산란패턴상에서 산란돌기들의 반사각 사이의 각도간격  $\Delta\theta_{2m}$ 에 의해 구해질 수 있다. 여기서  $\Delta\theta_{2m}$ 은 식 (10)의  $\theta_{2m}$ 을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\theta_{2m} = \theta_{2m} - \theta_{2(m-1)} \quad (11)$$

식 (10)에서  $\theta_1, \lambda, m$ 을 고정시키면  $\theta_{2m}$ 이  $F$ 만의 함수가 되므로 식 (11)의  $\Delta\theta_{2m}$ 도  $F$ 만의 함수가 되고,  $\Delta\theta_{2m}$ 을 이용하여  $F$ 를 구할 수 있게 된다. 인선반경  $R_n$ 이 가공이 실시되기 전에 미리 결정되기 때문에, 표면에 잔존하는 공구흔적이 이론적으로 예측된 바와 같이 유지된다면 다음의 관계식에 의해 산란돌기 사이의 반사각 간격만으로도 거칠기의 산출이 가능하다.

$$R_a \approx F^2 / (18\sqrt{3}R_n) \quad (12)$$

### 3.3 정규분포 표면(normal surfaces)

정규분포 표면(가우시표면)은  $z(x)$ 의 비대칭도(skewness)  $R_{sk}$ 가 0이고 뾰족도(kurtosis)  $R_k$ 가 3인 확률표면이다. 이 표면은 가장 자연적이고 대표적인 확률표면이며 이론적인 산란방정식이 존재하는 표면이다. 따라서, 이 표면의 산란패턴에 대한 분석은 그 자체에 대한 거칠기와 산란패턴 사이의 관계를 줄뿐만 아니라 이 표면에 적용될 패턴인식 방법과 과정이 다른 확률표면에도 적용될 수 있을 것이란 점에서 매우 중요하다.

정규분포표면의 산란광각도는  $z(x)$ 의 표준편차인  $\sigma(=R_q)$ 와 상관거리  $T_c$ 의 함수로 유도되며, 산란패턴이 정반사 광각도와 난반사 광각도의 합으로 표현된다.  $T_c$ 는 주로 난반사 광각도에 기여한다. 산란방정식 (1)은 이 표면에 대해 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$I(\theta_2) = |2LKC|^2 \text{Exp}(-g) \{ 2L \text{sinc}^2(\nu_x L) + T_c \sqrt{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! \sqrt{m}} \text{Exp}(-\nu_x^2 T_c^2 / 4m) \} \quad (13)$$

$$g = 4\pi^2 R_q^2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2 / \lambda^2 \quad (14)$$

Fig. 7은  $T_c$ 가 일정한 경우에 정규분포표면의 산란패턴이  $R_q$ 의 변화에 따라 변화하는 형태를 도시한다. 이 그림은 작은 값의  $T_c$  ( $T_c = 10\mu\text{m}$ )와 큰 값의  $T_c$  ( $T_c = 200\mu\text{m}$ )에 대해 작성되었다. 그림은 이 표면이  $T_c$ 에 따라 달라지기는 하지만 전체적으로 볼 때 거칠기  $R_q$ 에 따라 정반사가 지배적인 표면

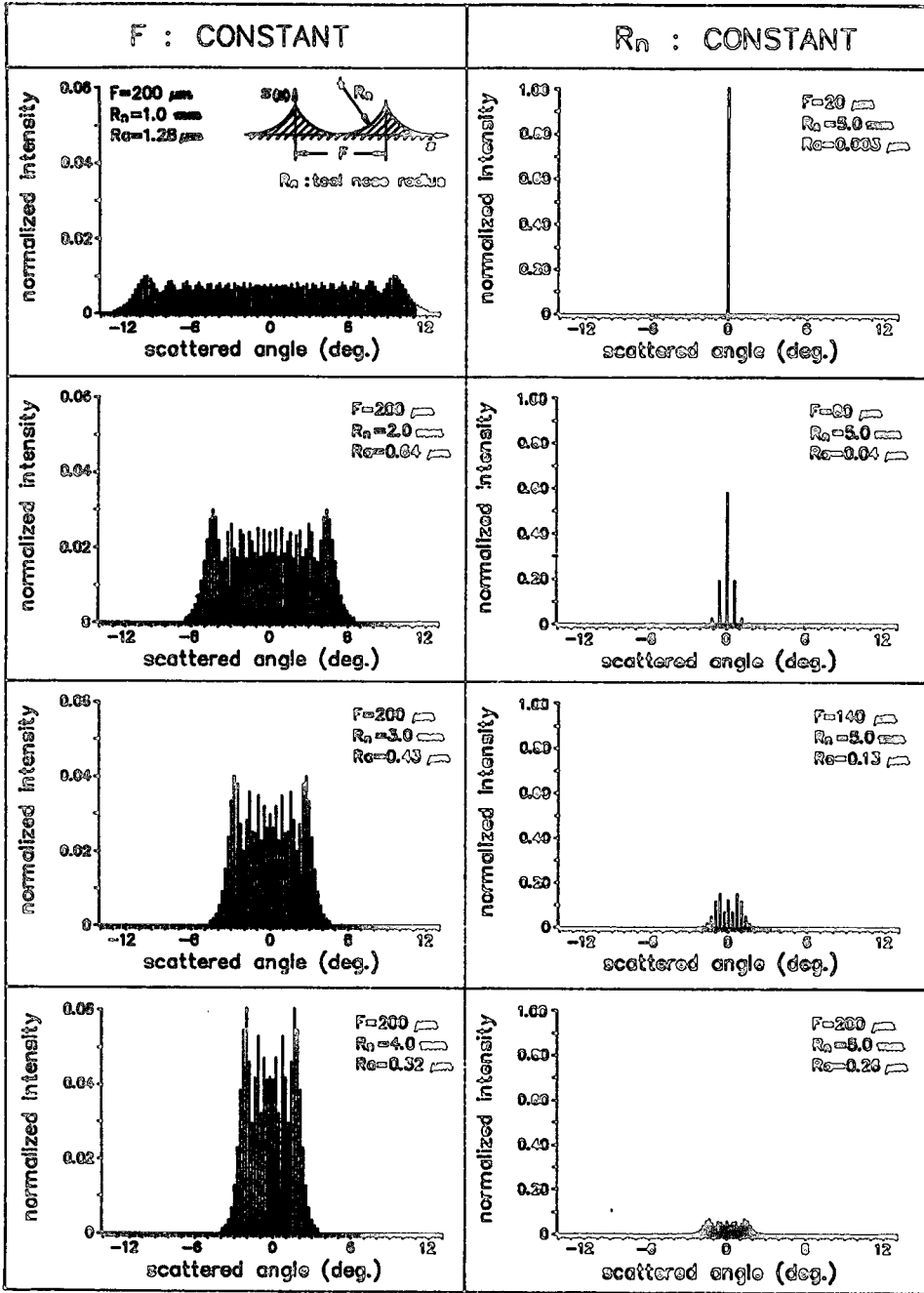


Fig. 6 Scattered patterns of turned profiles

과 난반사가 지배적인 표면의 2가지로 분류될 수 있음을 보여준다. 정반사 지배적인 표면은 근사적으로 거칠기가  $R_q \leq 0.125\lambda$  범위, 난반사 지배적인 표면은 거칠기가  $R_q > 0.125\lambda$  범위로 볼 수 있다. 일정한  $T_c$ 에 대해  $R_q$ 의 변화는 광강도의 변화를

유도하여  $R_q$ 가 클수록 즉 표면이 거칠수록 광강도가 작아지고,  $R_q$ 가 작을수록 즉 표면이 고울수록 광강도가 커진다.  $R_q$ 가 일정한 경우에  $T_c$ 의 변화에 대한 산란패턴은 정반사 지배적인 표면에서는  $T_c$ 가 중요하지 않지만 난반사가 지배적이거나 무

FAM

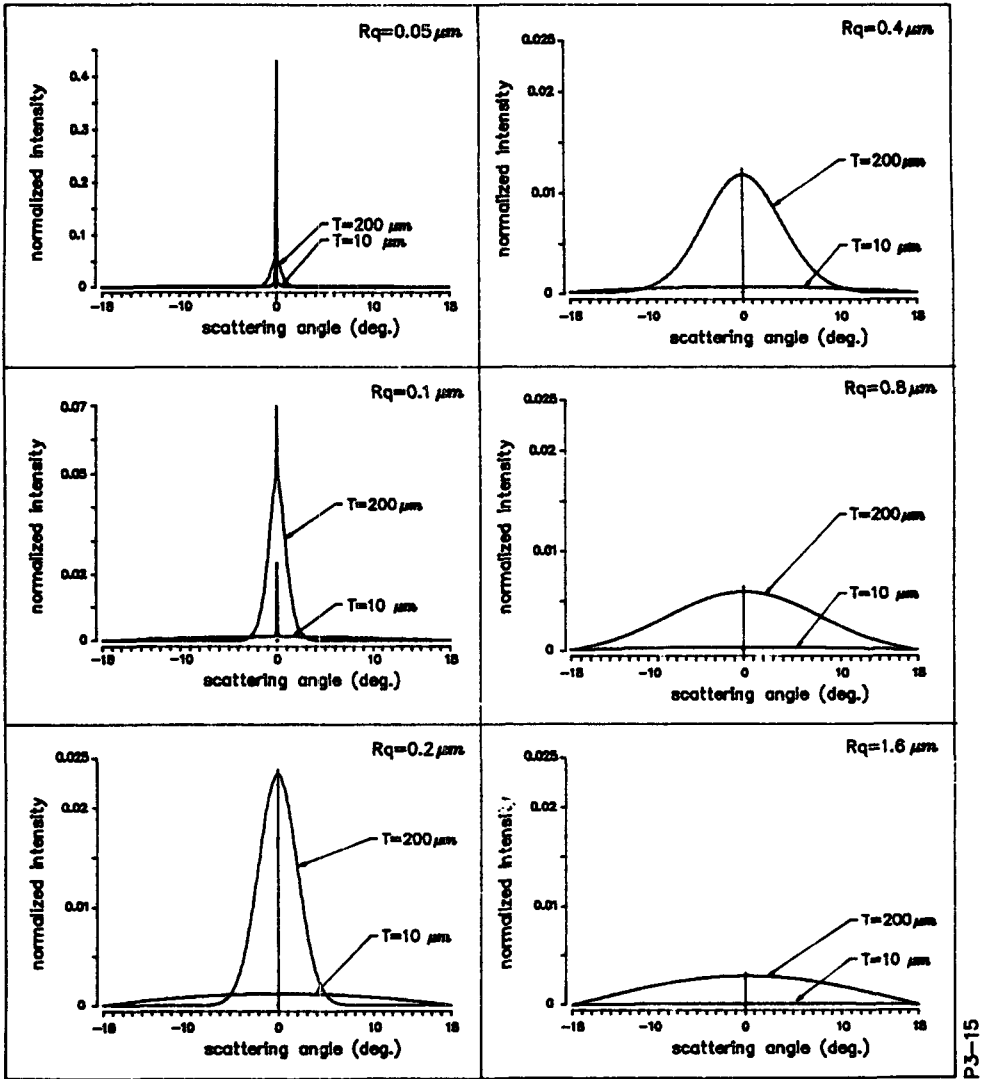


Fig. 7 Scattered patterns of normal profiles

시될 수 없는 표면에서는 큰 영향을 미쳐서 산란패턴의 전반적인 광강도와 분산을 변화시킴을 보여준다.  $T_c$ 가 클수록 패턴의 전반적인 광강도가 높아지고 분산이 작아지며  $T_c$ 가 작을수록 패턴의 전반적인 광강도가 낮아지며 분산이 커져서 종모양 (bell type)의 가우스형태 (Gaussian form)를 유지하게 된다.

이상의 분석은 정규분포 표면에 대해 다음과 같은 결과를 준다.

(1) 산란패턴은 크게 나누어 볼 때 정반사 지배적인 패턴과 난반사 지배적인 패턴의 두가지로 분류

될 수 있으며, 정반사 지배적인 패턴에서는 상관거리의 효과가 무시될 수 있다. 정반사 지배적인 패턴에서는 정반사 광강도가 거칠기 산출에 유용하게 사용될 수 있다. 반면에 난반사 지배적인 패턴에서는 상관거리가 미리 알려질 것이 요구된다.

(2) 근사적으로 볼 때  $0.1\lambda R_q$  이상의 거칠기를 갖는 표면에 대한 산란패턴의 인식은 불가능하지는 않지만 현실적으로 곤란한 점이 많다.

(3) 정규분포 표면에 대한 이상의 결과는 연삭표면 등의 다른 확률표면에도 적용될 수 있을 것이다.



3.4 연삭 표면(ground surfaces)

주기표면이 아닌 실제의 공학표면들은 특별한 경우를 제외하고는 대부분 비정규 분포 형태의 확률 분포 형태를 보인다. 전통적으로 정규분포 형태(가우스형태)를 보이는 것으로 간주되어 온 연삭표면

들도 실제에 있어서는 대부분의 경우 비정규분포를 보인다. 이 형태의 표면의 특성은 일반적으로  $z(x)$ 의 통계적 특성을 이용하여 표현된다. 공학적인 의미의 표면거칠기 입장에서 볼때 표면의 특성은 표면의 3가지 진폭거칠기변수( $R_q, R_{sk}, R_{ku}$ )와 수평방

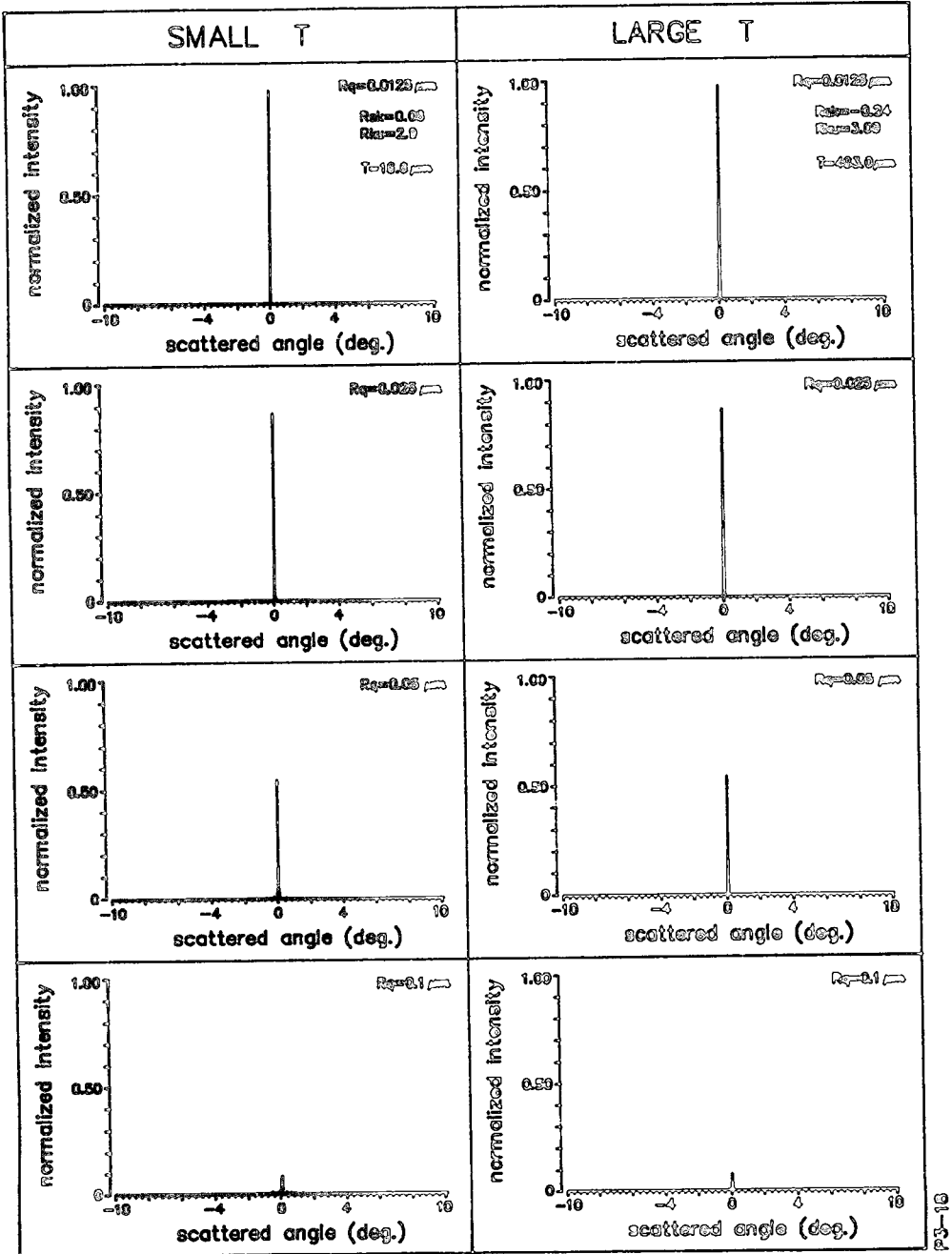


Fig. 8 Scattered patterns of smooth ground profiles

향( $x$ )의 자기상관함수  $C(\tau)$ 에 의해 표현 가능하다.

이들 표면에서는 정규분포 표면과 같이 이론적인 산란방정식이 유도되기가 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 수치적분 방법을 이용하여 대표적인 실제의 확률표면인 연삭표면과 유사한  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  및

$T_c$ 를 갖는 모델표면의 산란패턴을 분석하고, 이의 분석에 정규분포 표면에 대한 분석의 방법과 결과를 응용해 보고자 하였다.

정규분포 표면의 분석방법과 결과를 응용하기 위해서는  $z(x)$ 의  $R_{sk}$ 와  $R_{ku}$ 가 일정하게 유지되면서

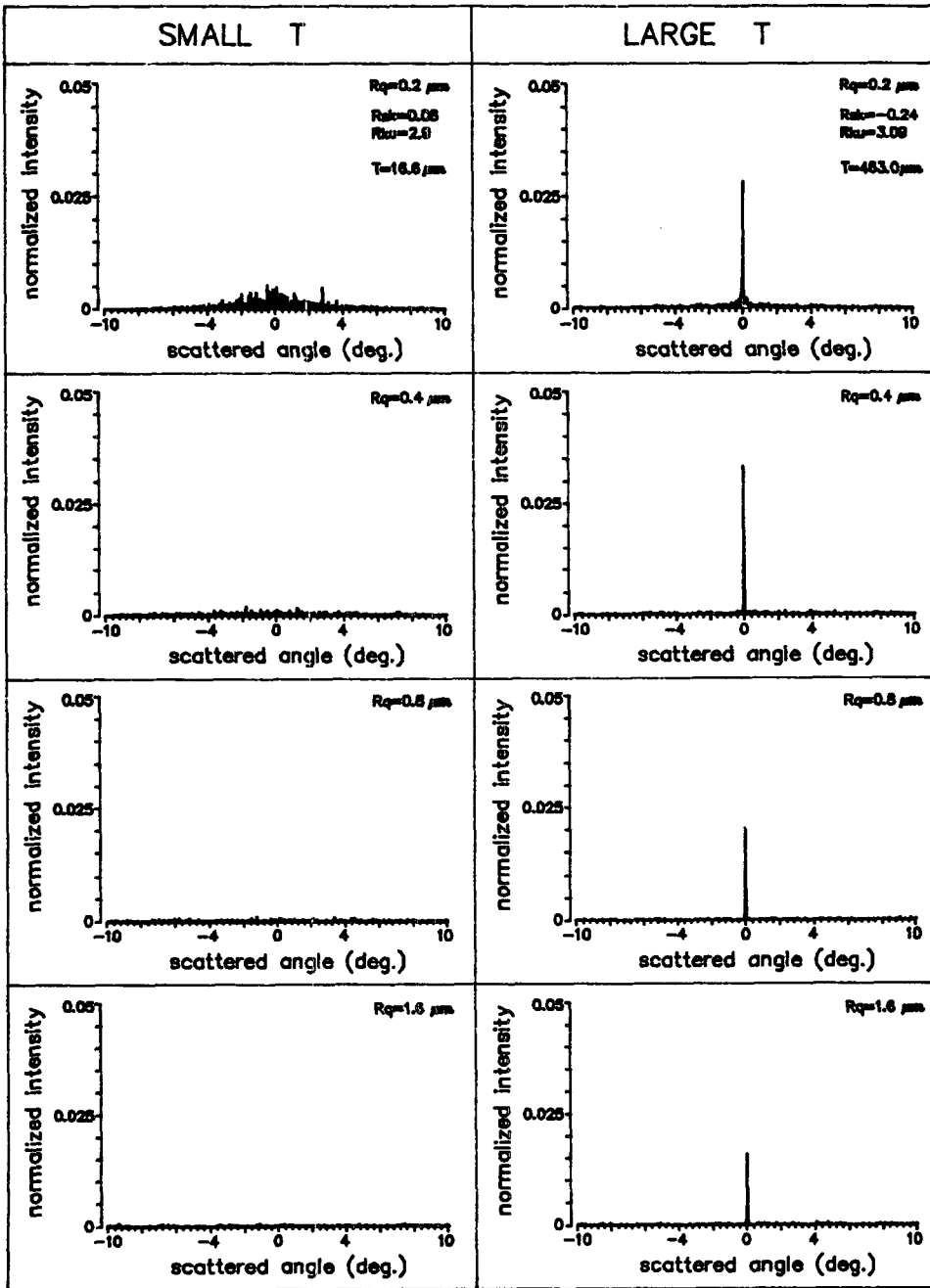


Fig. 9 Scattered patterns of rough ground profiles

거칠기  $R_q$ 가 변화하는 일련의 표면군이 준비되고 분석되어야 한다. 이 경우에 상관거리  $T_c$ 는 모든 거칠기 범위에 대해 일정하게 유지되거나  $R_q$ 에 대해 미리 알려진 방법으로 변화해야 된다. 그러나 기존의 가공기계들을 사용하는 실제의 공정에서 이 같은 표면군들을 생성시키기는 기계의 진동이나 안내면의 오차, 일정한 정적 및 동적 가공조건의 유지, 가공자의 숙련 등의 입장에서 볼때 매우 어렵다. 참고로 연삭공정의 예를 들어보면 사용되는 연삭숫돌의 입자크기(grain size), 입자 및 입자의 분포형태, 드레싱(dressing)조건, 절삭깊이, 기계의 진동이나 안내면의 오차, 가공의 동특성 등등에 따라 생성되는 연삭표면의 통계적특성이 크게 달라진다<sup>(16)</sup>.

따라서 본 연구에서는 실제 연삭표면으로부터 측정된 거칠기 측정기를 사용하여 측정된 높이 데이터를 이용하여 이 표면과 동일한  $R_{sk}$ 와  $R_{ku}$ 를 가지면서  $R_q$ 만 변화하는 모델 표면군을 컴퓨터로 생성시키고 식(3)~식(5)를 이용하여 적분하였다. 이를 위해 표면들기들의 간격은 변화시키지 않고  $z(x)$  방향만 스케일링(scaling) 하는 방법이 사용되었다. 이 방법은  $R_{sk}$ 와  $R_{ku}$  및  $T_c$ 를 일정하게 유지

시키는데  $R_{sk}$ 와  $R_{ku}$ 가 일정하게 유지되는 이유는 이 두 변수들이  $R_q$ 의 함수로 표현될 수 있기 때문이다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 이상의 방법으로 모델된 표면군에 대한 분석의 결과를 도시한다. Fig. 8은 정반사 지배적인 표면에 대한 산란패턴을 보여주며 Fig. 9는 난 반사 지배적인 표면의 패턴을 보여준다. 두 그림의 왼쪽 열은  $R_{sk}=0.06$ ,  $R_{ku}=2.9$ ,  $T_c=16.6\mu m$ ,  $R_q=1.36\mu m$  인 실제 연삭표면으로부터 모델된 표면들의 산란패턴이다. Fig. 8은 통계적 특성이 서로 다름에도  $0.1\mu m R_q$  이하의 표면에서는 정규분포 표면의 패턴과 유사하게 정반사 지배적인 패턴으로 인식될 수 있음을 보여준다. Fig. 9는  $0.2\mu m R_q$  이상의 표면들의 산란패턴은  $T_c$ 에 크게 의존적임을 보여준다. 이 거칠기 영역에서  $T_c$ 가 작은 경우에는 난반사 지배적인 형태를 보이며,  $T_c$ 가 매우 큰 경우에는 거친 표면임에도 불구하고 정반사 지배적인 패턴 형태를 보인다.

연삭표면의 산란특성에 대한 결과는 다음과 같다.

(1) 연삭표면과 같은 확률표면의 산란패턴은 정규분포 표면의 산란패턴과 동일한 방법으로 인식될

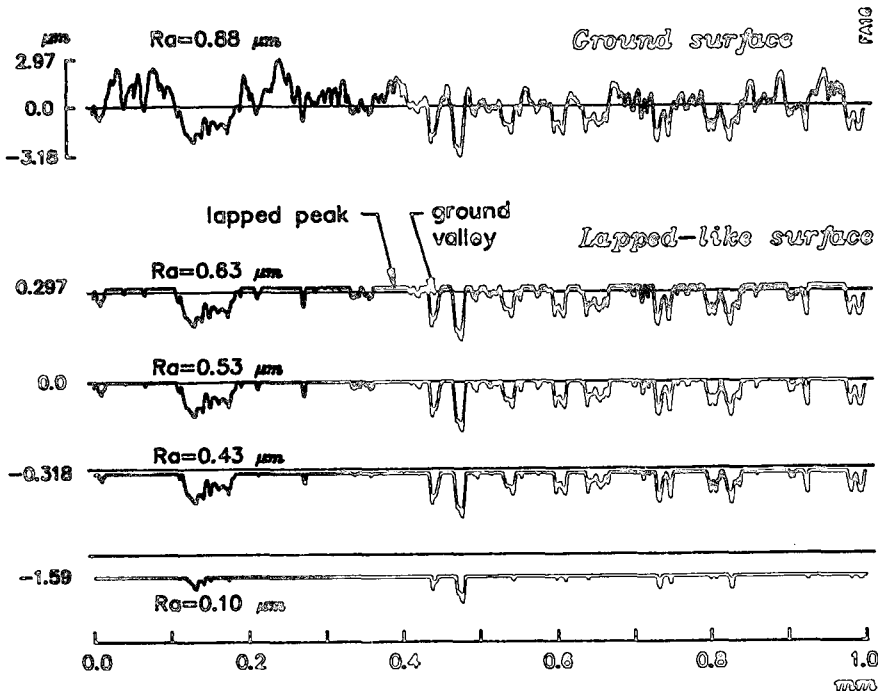


Fig. 10 Modeled lapped-like profiles

수 있으며, 정규분포 표면에 대한 분석결과가 원용될 수 있음을 보여준다.

(2)  $0.2\mu\text{m } R_q$  이상의 거친 표면에 있어서 상관 거리가 작은 경우에는 정규분포 표면에서 이론적으로 예측된 바와 같이 난반사 지배적인 산란형태를 보이나,  $T_c$ 가 매우 큰 경우에는 거친 표면에서도 정반사 지배적인 산란형태를 보인다.

3.5 래핑류 표면 (lapped-like surfaces)

래핑 (lapping)은 매우 높은 표면정밀도를 얻기 위한 정밀가공 공정으로 기본적으로 연삭가공 후에 행해지며 그 표면은 평평한 마루(peak)부와 연삭 표면의 골(valley)부를 갖는 형태를 보인다. 이 표면은 일차적으로 공구의 복제에 의해 생성된 표면의 마루(peak) 부분을 일정량만큼 평평하게 제거

시켜 얻어지는 것으로 간주된다. 따라서 Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 1차 공정에 의해 형성된 골부와 2차 공정에 의해 가공된 마루부를 갖게되므로 원리적으로는 두 공정에 의한 효과가 산란패턴에 중첩되어 나타나게 된다. 이와 같이 두가지의 가공공정에 의해 표면이 형성되는 가공에는 래핑 이외에도 호우닝(honing), 폴리싱(polishing), 슈퍼피니싱(super-finishing) 등의 여러 공정이 있으며 표면의 형태도 서로 다르다. 본 연구에서는 래핑류 표면의 대표적인 예로써 이론적으로 모델된 래핑표면들에 대해 식 (3)~식(5)를 이용하여 적분하고 산란패턴을 분석하였다.

Fig. 10은 연삭표면에 래핑이 행해진다고 가정했을 때 래핑공정의 진척에 따라 생성되는 표면들의 단면곡선을 보여준다. 이 이론적 표면들은

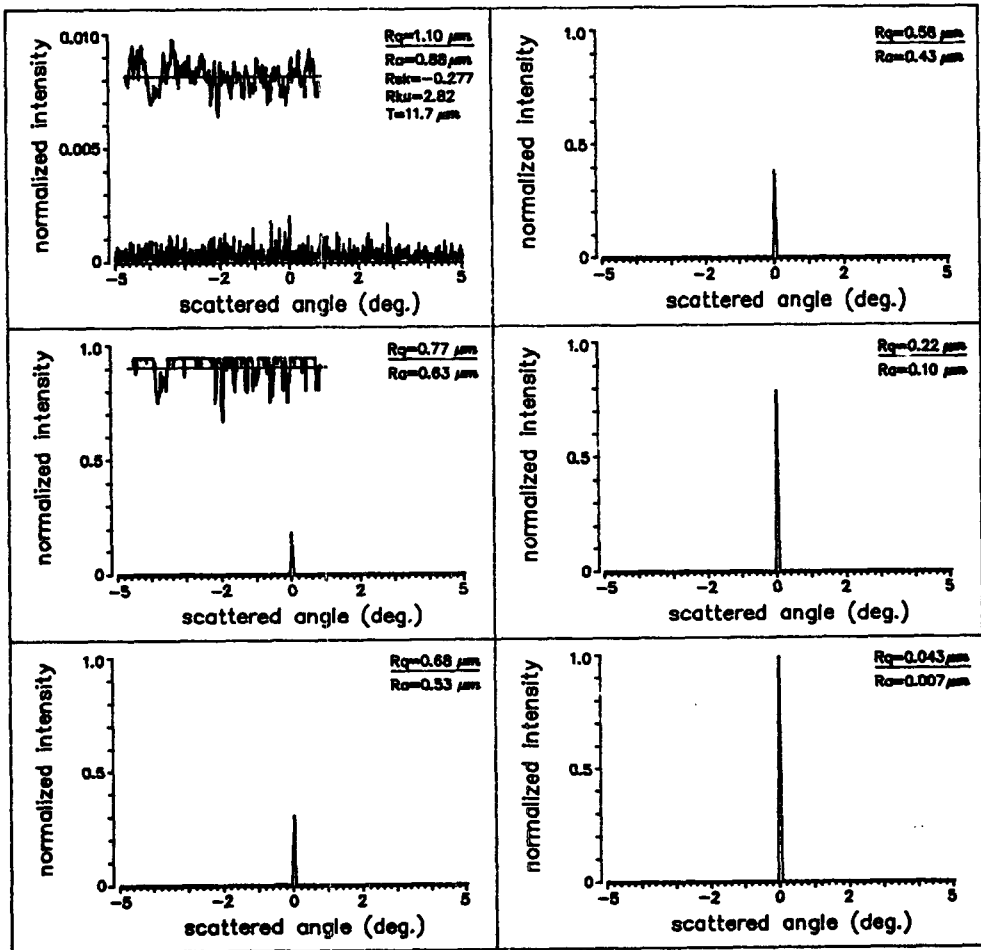


Fig. 11 Scattered patterns of modeled lapped-like profiles

LAP-PAT

0.88 $\mu\text{m}$   $R_a$ 의 평면연삭된 표면이 래핑이 진행됨에 따라 마루부분이 점점 평평하게 제거되는 것으로 모델하여 컴퓨터 생성된 것이다. 래핑에 의해 제거되어 평평해진 마루부분은 국부 표면 경사각이 0°가 되며 이 부분에서 반사된 빛은 정반사 방향으로 나아간다. 따라서 산란패턴은 래핑된 평평한 마루부의 영향으로 인해 정반사 지배적인 형태를 보인다. Fig. 11은 Fig. 10의 모델표면에 대한 산란패턴을 보여주는데 래핑의 진행정도, 즉 거칠기에 관계없이 모든 표면들의 산란패턴이 정반사 지배적인 패턴으로 인식될 수 있음을 보여준다.

이상과 같이 모델된 래핑표면들의 산란특성은 다음과 같다.

(1) 래핑표면의 산란패턴은 표면 거칠기와 무관하게 정반사 지배적인 산란형태를 보인다. 따라서 정반사 광각도가 표면거칠기의 산출에 유용하게 사용될 수 있다.

(2) 래핑표면의 산란패턴은 원리적으로는 표면의 골부에 의한 난반사 산란패턴과 평평한 마루부에 의한 정반사 산란패턴의 중첩으로 구성되며, 정반사 지배적인 형태를 보인다.

(3) 표면 거칠기의 값이 큰 경우에도 래핑표면들이 정반사 지배적인 산란형태를 보이는 것은 래핑에 의해 평평하게 제거된 마루부의 정반사 때문이다.

#### 4. 결 론

기계공학 분야에서 널리 사용되는 대표적인 공학 표면들의 산란특성을 파악하기 위한 컴퓨터 수치분석이 행해졌다. 이 분석은 Beckmann의 광산란 이론에 근거한 수치적분에 의해 수행되었는데 산란패턴의 특성과 표면의 거칠기를 결정짓는 인자들 사이의 관계에 관심이 집중되었다. 이 정성적 고찰은 표면거칠기가 표면생성에 사용된 공구와 공정의 복제로 구성되며 표면에 파상도가 존재하지 않는다는 가정하에 진행되었다. 5가지의 모델표면들에 대한 분석이 수행되었으며, 그 결과 다음과 같은 사실들이 밝혀졌다

(1) 정현파표면의 표면거칠기와 산란패턴은 표면의 주기  $T$ 와 진폭  $H$ 에 의해 그 거칠기값과 패턴의 형태가 결정된다.

(2) 선삭표면에서는 바이트의 이송  $F$ 와 인선반경  $R_n$ 에 의해 표면거칠기 값과 산란패턴의 특성이

결정된다.

(3) 정규분포 표면의 경우에는 정반사 광각도가 0.1 $\lambda R_n$  이하의 거칠기 범위에서 유용한 측정변수로 사용될 수 있다. 이보다 거친 표면의 경우에는 산란패턴으로부터 거칠기를 산출하기 위해 상관거리  $T_c$ 가 요구된다.

(4) 연삭표면의 산란패턴은 정규분포 표면의 산란패턴과 유사한 특성을 보이거나  $T_c$ 가 매우 큰 경우에는 거친 연삭표면에서도 정반사 지배적인 산란패턴을 보인다.

(5) 래핑류 표면의 산란패턴은 거칠기에 관계없이 정반사 지배적인 형태를 보인다.

(6) 이상의 분석은 파상도의 영향이 최소화 되도록 가공공정이 잘 제어되는 경우에는 매우 유용한 광산란 패턴의 해석수단을 제공할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Church, E.L., 1979, "The Measurement of Surface Texture and Topography by Differential Light Scattering," *Wear*, Vol. 57, pp.93~105.
- (2) Thwaite, E.G., 1982, "A Quantative Comparison of the Wavelength Spectrum of a Surface Obtained by Optical Fourier Transformation with calculations from Profile Measurements," *Wear*, Vol. 83, pp.181~187.
- (3) Rackels, J.H. and Hingle, H.T., 1986, "The Use of Optical Diffraction Techniques to Obtain Information about Surface Finish, Tool Shape and Machine Tool Condition," *Wear*, Vol. 019, pp. 259~266.
- (4) Rackels, J.H., 1988, "In-process Surface Finish Measurement of High Quality Components," *Proc. Int. Congress for Ultra-Precis. Tech.*, Aachen, FRG, pp. 177~184.
- (5) Kim, S.W., 1984, "Adaptive Computerized Numerical Control of the Grinding Process," Ph. D Dissertation, Dept. for the Design of Machine Systems, Cranfield Inst. of Tech.
- (6) Inasaki, I., 1985, "In-Process Measurement of Surface Roughness During Cylindrical Grinding Process," *Precis. Engng*, Vol.7, No.2, pp. 73~76.
- (7) Brodmann, R., 1984, "An Optical Instrument for Mearsuring the Surface Roughness in Pro-

- duction Control," *Annals of the CIRP*, Vol.33, No.1, pp. 403~406.
- (8) Brodmann,R. and Thurn,G., 1986, "Roughness Measurement of Ground, Turned and Shot-Peend Surfaces by the Light Scattering Method," *Wear*, Vol.109, pp.1~13.
- (9) Lee, C.S., Kim,S.W. and Yim,D.Y., 1987, "An In-Process Measurement Technique Using Laser for Non-Contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surfaces," *Annals of the CIRP*, Vol.36, No.1, pp. 425~428.
- (10) Yim, D.Y. and Kim,S.W., 1990, "Optical Roughness Measurement of Ground Surfaces by Light Scattering," *Int. J. Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 30, No. 2, pp. 283~289.
- (11) Yim,D.Y. and Kim,S.W., 1990, "On-Line Measurement of Surface Roughness by Light Scattering," *Japan-U.S.A. Symposium of Flexible Automation-A Pacific Rim Conference, ISCIE*, Kyoto, Japan, pp. 703~706.
- (12) 임동열, 1991, "정밀가공 표면의 광학적 비접촉식 인프로세스 표면평가", 한국 과학기술원 생산공학과 박사학위 논문.
- (13) Park,B.C., 1990, "Effect of Multiple Scattering on Intensity Correlation of Speckle Backscattered from Randomly Rough Metal Surface," Ph.D. Dissertation, Dept. of Physics, KAIST.
- (14) Beckmann and Spizzichino, 1963, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Pergamon Press, Oxford.
- (15) KS B 0161 (Korean Industrial Standard) *Surface Roughness*.
- (16) Bhateja,C. and Lindsay,R., 1982, "Ginding : Theory, Techniques and Troubleshooting," *SME*.