

旋盤作業에서의 FFT Analyzer에 의한 表面거칠기 解析

金 敬 年*·崔 殷 淳**

Analysis of Surface Roughness by FFT Analyzer in Turning Operation

Gyung-Nyun Kim and Eun Soon Choi

Abstract This paper shows that the identified and unidentified components of surface roughness in NC turning lathe which can not be analyzed in time domain such as R_{max} , R_a can be isolated in frequency domain by FFT analyzer.

By interfacing FFT analyzer with stylus surface roughness instrument, surface roughness on change of working condition, especially tool feed, such as 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3(mm/rev) can be analyzed in frequency domain as follows.

1. By frequency analysis of surface roughness profile, the basic wave length of surface roughness can be obtained to isolate the identified and unidentified components of surface roughness.
2. With increase of tool feed, the unidentified components of surface roughness increase.
3. Since R_{max} , which can be obtained by stylus surface roughness is proportion to the output voltage of FFT analyzer, FFT analyzer also can be used to measure surface roughness in time domain such R_a , R_{max} .

1. 序 論

機械加工된 면의 表面性狀(Surface Integrity)은 기계부속품들의 性能, 壽命 그리고 信賴性등에 대한 요구조건들을 만족시키기 위하여 점점 더 중요시 되고 있다. 특히 표면

거칠기는 潤滑성, 크랙형성, 마모등에 영향을 미치기 때문에 기계가공물의 수명과 성능에 중요한 역할을 한다.^{1), 2)} 따라서 표면거칠기를 糾明하고 향상시키기 위하여 많은 연구들이 행하여 지고 있으나^{3), 4)} 이들은 단지 표면거칠기의 垂直成分을 나타내며, 표면거칠기에 미

* : 경남대학교 기계설계학과(Kyung Nam University)

** : 동명중공업(Dong Myeung Heavy Ind. Ltd.)

접수 : 1992년 8월 21일(Received August 21, 1992)

치는 因子에 대한 규명은 불가능하다.

이론적으로 선삭면의 표면거칠기는 공구반경, 이송등과 같은 確定因子에 의하여 결정되지만 실제 가공면의 표면거칠기 곡선은 構成刃線, 凝着物, 工具의 磨耗, 工作機械의 떨림등과 같은 불확정인자에 의하여 복잡적으로 형성되기 때문에 매우 복잡하다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 NC 선반가공에서 표면거칠기에 영향을 미치는 여러 요소 중에서 Pulse Motor에 의한 工具移送 變化가 표면거칠기에 어떤 영향을 주는가에 대하여 고찰하였으며, 시험편은 Pulse Motor에 의한 공구이송 변화에 대한 영향을 잘 나타낼 수 있도록 테이퍼 형태로 가공하였고, 그 테이퍼 각도는 15°, 45°, 75°로 하였다. 또한 축침식 표면거칠기 측정기에서 구할 수가 없었던 표면거칠기 곡선의 기본 과장을 구하여 확정인자에 의한 성분과 불확정 인자에 의한 성분을 분리하기 위하여 주파수 분석기를 사용하여 Profile을 周波數 領域에서 解析하였으며,^{6), 7)} 축침식 표면거칠기 측정기에서 구한 R_{max} 와 FFT Analyzer에서의 출력전압사이의 관계를 糾明하고자 한다.

2. 關係理論

2.1 Pulse Motor에 의한 工具移送 變化에 따른 表面거칠기 豫測

NC선반에서 공구이송은 Servo Motor의

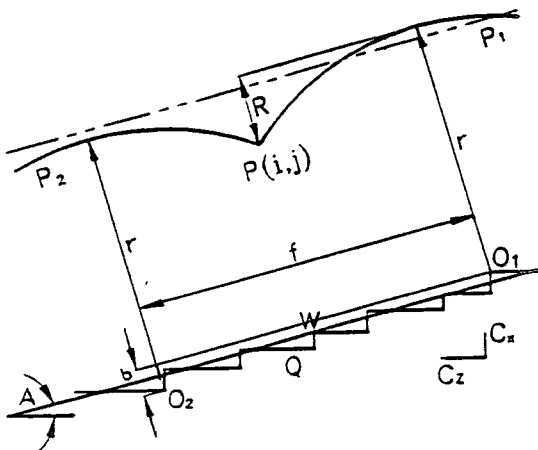


Fig. 1 Cutting surface model of NC lathe

회전운동을 Ball Screw를 통해 직선운동으로 바뀌어 이송되는데 그 移送量은 모터의 Pulse량에 비례한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 NC선반으로 테이퍼를 가공할 때에 대각선 이송은 Pulse Motor에 의한 x축방향 移送와 z축방향 移送의 습으로 이루어진다. 그런데 이송은 모터의 단위 Pulse당 움직이는 최소 설정거리 만큼씩 주어지기 때문에(본 연구에서는 $C_x=0.003mm, C_z=0.004mm$) Fig.1에서처럼 工具中心이 O_1 에서 O_2 로 이송될 때 공구 指令線과 공구중심 사이에는 약간의 차이(b)가 발생하는데 그 차이는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$0 \leq b \leq C_x \cos A + C_z \sin A \dots\dots\dots (1)$$

또한, 여기서 O_2 를 원점으로 r을 J축, 工具指令線과 평행한 축을 I축으로 하는 좌표계를 설정하면 工具半徑으로 이루어지는 두 원의 방정식은

$$I^2 + J^2 = r^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$(I - f)^2 + (J - b)^2 = r^2 \dots\dots\dots (3)$$

이다. 두원의 교점 P의 좌표중 J축좌표 j를 구하면

$$j = \frac{b}{2} + \frac{f}{2} \sqrt{\frac{4r^2}{f^2 + b^2} - 1} \dots\dots\dots (4)$$

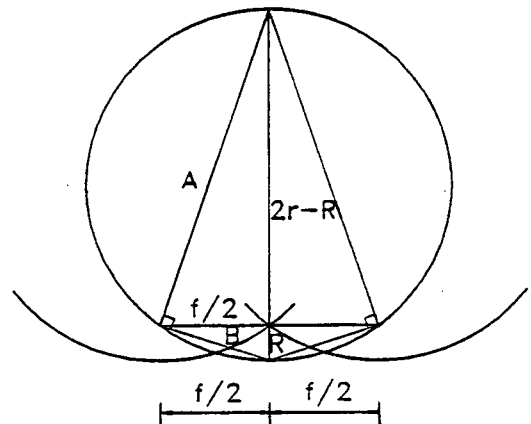


Fig. 2 Cutting surface model of lathe

따라서, 表面거칠기 R은

$$R=r+b-j=r+\frac{1}{2}\left[b-f\sqrt{\frac{4r^2}{f^2+b^2}-1}\right] \dots(5)$$

b=b_{max}일 때 R=R_{max}이므로

$$R_{max}=r+\frac{1}{2}\left[b_{max}-f\sqrt{\frac{4r^2}{f^2+b_{max}^2}-1}\right] \dots\dots\dots(6)$$

여기는 R_{min}은 보통선반 R값과 같으므로 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있는데, 피타고라스 定理에 의하여

$$A^2+B^2=[(2r-R)+R]^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$A^2=\left(\frac{f}{2}\right)^2+(2r-R)^2 \dots\dots\dots(8)$$

$$B^2=\left(\frac{f}{2}\right)^2+R^2 \dots\dots\dots(9)$$

R은 미소량이므로 R²은 거의 0에 가깝기 때문에 이를 無視하고 식(7), (8), (9)를 풀면

$$R=\frac{f^2}{8r}$$

이고, 따라서

$$R_{min}=\frac{f^2}{8r}$$

이다. 結局, R의 範圍는

$$R=\frac{f^2}{8r} \leq R \leq r+\frac{1}{2}\left[b_{max}-f\sqrt{\frac{4r^2}{f^2+b_{max}^2}-1}\right] \dots(10)$$

이다.

2.2 FFT Analyzer를 利用한 表面거칠기 解析

Signal해석에 있어서, 주파수 스펙트럼에 있어서의 情報가 시간영역에 있어서의 情報보다 해석하고 다루기가 더 쉽기 때문에 주파수영역으로 轉換이 널리 이용된다. 이것은 Signal해석의 觀點에서 표면거칠기에 있어서도 마찬가지이다. 일반적으로 표면거칠기의 定意는 약간씩 다르지만, 정의법에 관계없이 Waviness로 간주될 수 있는 Low Frequency/Low Wave Length의 成分을 제거하

기 위하여 Cut-Off Filter를 사용하여야만 한다.

푸리에 적분(Fourier Integral)은 임의의 신호를 周波數領域에서 분석하는 방법으로서 信號成分에 대한 물리적 의미는 좁은 帶域필터(Narrow Band Filter)에 의하여 여과된 각 信號成分의 RMS값이라고 할 수 있다. 다른 周波數로 조절된 많은수의 좁은 帶域필터를 사용함으로써 RMS값들은 이러한 周波數 領域에서 결정된다. 그러나 周波數 스펙트럼을 얻기 위하여 좁은 帶域필터 대신에 푸리에 변환으로써 周波數 成分의 分析이 가능하다. 푸리에 변환의 特性上 RMS값으로 표시되는 振幅軸은 表面거칠기 解析에 있어서 R_{rms}값으로 해석될 수 있다. 이 振幅軸은 對數눈금으로 변환함으로써 훨씬 넓은 動的인 範圍(Dynamic Range)에서 스펙트럼 해석이 가능하며 이러한 對數눈금이 사용될려면 基準(Reference)이 선택되어야만 한다. 따라서 表面 거칠기(dB)는

$$dB=20 \times \log(\text{Output/Reference}) \dots\dots\dots(11)$$

와 같이 定義되지만, 본 연구에서는 基準을 0.001μm로 선택하였기 때문에

$$dB_r=20 \times \log(R_{rms}/0.001) \dots\dots\dots(12)$$

이다. 따라서 0dB은 0.001μm R_{rms}, 20dB은 0.01μm R_{rms}, 40dB은 0.1μm R_{rms}등으로 계산될 수 있기 때문에 식(12)에서 表面 거칠기 曲線을 周波數 分析함으로써 各 周波數別로 表面 거칠기값을 결정할 수 있다.

한편, 正弦波의 表面 거칠기 曲線은 단지 하나의 波장을 포함하기 때문에 하나의 頂點을 가진 스펙트럼으로 變경된다. 일반적인 表面 거칠기 曲線은 몇개의 다른 주파수 成分을 가진 곡선의 組合으로 간주할 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin nx + b_n \cos nx) \dots\dots\dots(13)$$

식(13)에서 振幅 a₁이 a₂……a_n, b₁……b_n등보

다 훨씬 크다면 曲線은 $a_i \sin \alpha$ 만의 函數로 간주할 수 있다.

결국

$$\left. \begin{aligned}
 & m(f_1) \geq 10m(f_2) \text{인 경우에는 식(12)에서} \\
 & R_{rms} = 0.001 \times 10^{\frac{m(f_1)}{20}} \\
 & \text{으로 표시되며, 그 이외의 경우는} \\
 & R_{rms} = \sqrt{\sum_{f=1}^n [m(f)]^2}
 \end{aligned} \right\} (14)$$

여기서, $m(f)$: 頂點을 갖는 周波數의 振幅(dB)으로 표시할 수 있다.

몇개의 서로 다른 周波數 成分을 가진 波형들이 組合하여 이루어진 表面 거칠기 曲線은 頂點과 골짜기 사이의 높이 및 中心線을 선정할 수 없으므로 R_{rms} 와 R_{max} 및 R_a 를 서로 연관시킬 수 없다. 그러나 식(14)의 $m(f_1) \geq 10m(f_2)$ 인 경우에는 f_1 을 제외한 모든 다른 周波數에서의 振幅은 "0(Zero)"으로 간주할 수 있으므로 R_{rms} 값은 頂點의 높이와 같다. 이 경우에는 表面 거칠기의 다른 변수들과 연관시킬 수 있다. 즉 한개의 周波數 成分만을 갖고 있는 表面 거칠기 曲線은

$$y(\alpha) = a \sin \frac{2\pi\alpha}{L} t \dots\dots\dots(15)$$

로 표시할 수 있다.

R_{rms} 는 定義에 의하여

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y(\alpha)^2 d\alpha} = \frac{a}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(16)$$

이고, R_a 역시 定義에 의하여

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(\alpha)| d\alpha = \frac{2a}{\pi} \dots\dots\dots(17)$$

으로 표시된다.

R_{max} 는 表面 거칠기 曲線의 頂點으로부터 골짜기 사이의 높이이므로 한개의 周波數 成分만을 갖는 경우에는

$$R_{max} = 2a \dots\dots\dots(18)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 R_{rms} 와 R_a , 또한 R_{rms} 와 R_{max} 와의 相關關係를 각각 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned}
 & R_a = R_{rms} \times \sqrt{2} \pi \\
 & R_{max} = R_{rms} \times 2 \sqrt{2}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

3. 實驗方法

주파수 영역에서 표면 거칠기 곡선을 분석하기 위하여 기계구조용 탄소강(SM45C)을 $\phi 50 \times 75$ mm로 전가공하여 Bed Length : 520 mm, Swing : 500mm 인 NC선반에서 테이퍼 각도를 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ 로 변화시키고 각각의 테이퍼 각도에 대하여 이송을 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35(mm/rev)로 변화시키면서 가공하였다. 이 가공된 시험편은 축침의 횡단속도를 0.12mm/sec로 하여 Stylus Tip Diamond 5 μ m인 축침식 표면거칠기 측정기로 측정하여 Single Channel, Frequency Range가 0Hz~40kHz인 FFT Analyzer를 통하여 표면거칠기 측정기의 變位에 대한 Signal을 주파수 영역에서 해석하였다.

4. 實驗 結果 및 考察

4.1 R_{max} 에 대한 理論値와 實驗値의 比較

Pulse Motor에 대한 공구이송 변화에 따른 표면거칠기 R_{max} 의 이론 범위는 식(10)과 같다. 본 실험에서는 축침식 표면거칠기 측정기를 사용하여 각각의 테이퍼진 시험편에 대하여 2번씩 측정하여 그때마다 Surface Profile을 구한 다음 R_{max} 의 평균값을 계산하였다. 테이퍼 각도 15° 일 때 이송 변화에 대한 이론 및 실험값 변화에 대한 경향은 Fig. 3에서 나타내고 있으며, Fig. 4는 테이퍼 각도 45° 에 대한 R_{max} 의 변화를 보여주고 있다. 이들 그림에서 R_{ex} 는 실험을 통하여 얻어진 R_{max} 값이고, R_{th} 에서 $b=0$ 는 工具指令線과 工

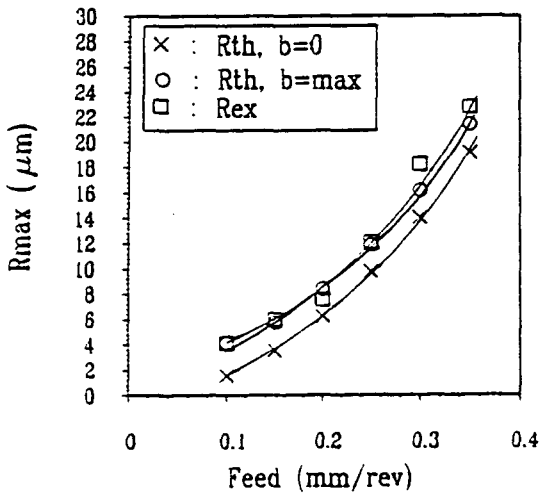


Fig. 3 Surface roughness vs. feed at taper angle of 15°

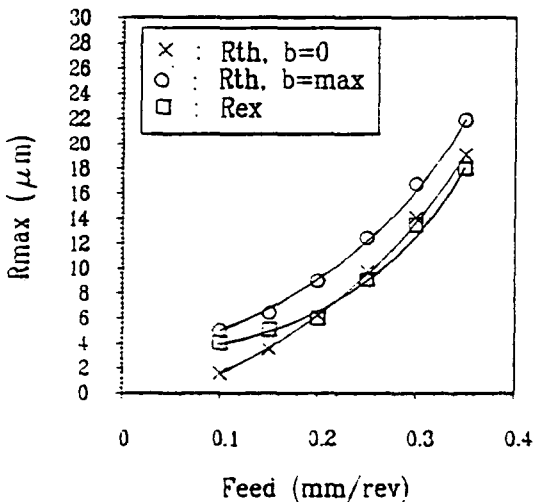


Fig. 4 Surface roughness vs. feed at taper angle of 45°

具中心과의 간격이 없는 경우 R_{max} 의 이론값이며 $b=max$ 는 최대 간격에 대한 R_{max} 의 이론값을 의미한다. Fig. 3, 4에서 테이퍼 각도가 45°일 때는 실험치 R_{max} 가 대부분 이론치 범위의 下限 部分에 분포되어 있었고, 테이퍼 각도가 15°일 때에는 실험치 R_{max} 가 거의 이론치 범위의 上限 範圍에 분포되어 있음을

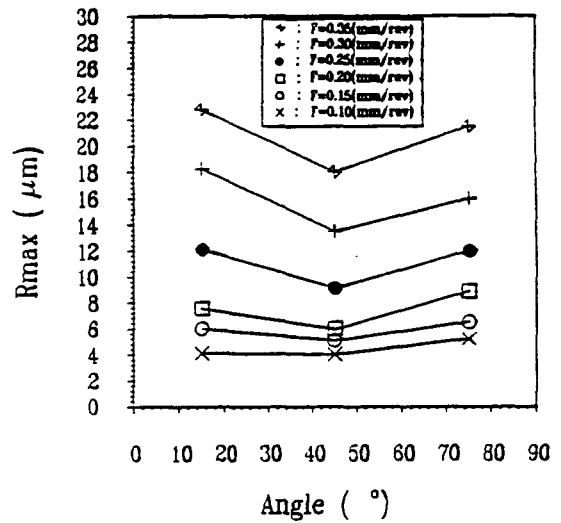


Fig. 5 Surface roughness vs. taper angle

알 수 있었다. 이송증가에 따른 R_{max} 의 증가 경향은 Fig. 3, 4에 나타난 바와 같이 다소 차이는 있지만 이송의 증가와 더불어 R_{max} 역시 증가하고 있다. 이는 이송증가에 따라 절삭 저항이 증가하고, 무늬의 간격이 커짐으로써 不確定 因子들의 영향이 부가되었기 때문이다. 또한 일정 이송에 대하여 테이퍼 각도 변화에 따른 R_{max} 의 분포를 Fig. 5에 나타내었으며, 이 그림에서 이송이 적을 때에는 테이퍼 각도에 따른 R_{max} 의 차이는 거의 없었지만 이송이 커짐에 따라 테이퍼 각도가 15°, 75°인 때와 45°일 때에는 R_{max} 의 차이가 크음을 알 수 있다. 이는 테이퍼 각도 45°일 때가 工具中心과 工具指令線 사이의 간격(b_{max})이 가장 커지기 때문에 상대적으로 R_{max} 가 적어지기 때문이다.

4.2 基本波長 成分分析

표면거칠기 곡선을 주파수 영역에서 분석하여 기본파장의 길이를 구하였고,⁶⁾ 그에 해당하는 振幅은 FFT Analyzer의 出力電壓으로 구하였다. 테이퍼 각도가 15°, 45°에 해당하는 시험편에 대하여 이송 변화와 기본 파장의 길이와의 관계는 Fig. 6, 7과 같고, 같은 각도에서 基本波長の 振幅과의 관계는 Fig. 8, 9와 같다. 여기서 각 시편측정에서 발생되는

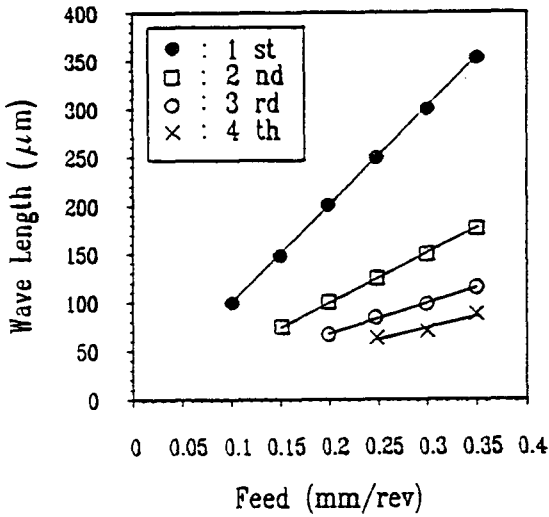


Fig. 6 Wave length vs. feed at taper angle of 15°

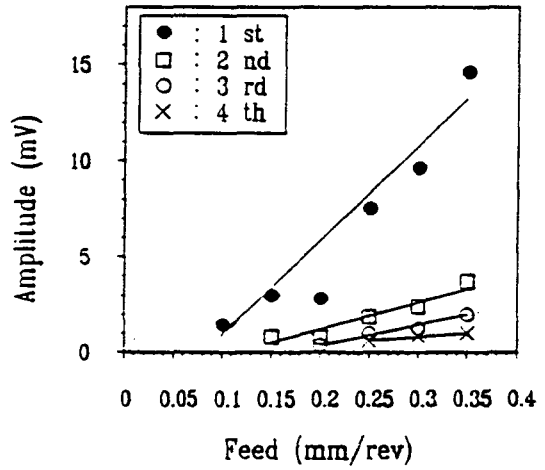


Fig. 8 Amplitude vs. feed at taper angle of 15°

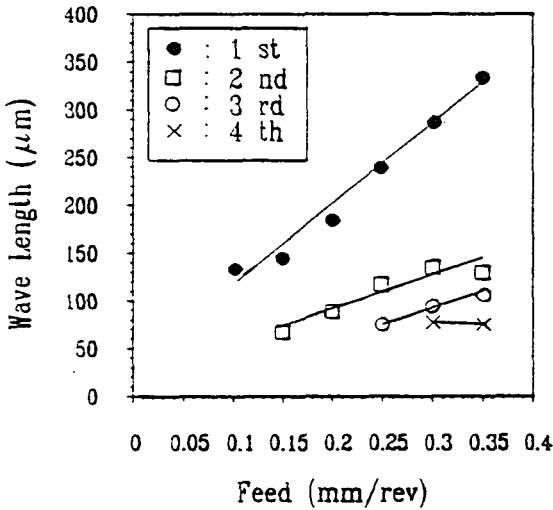


Fig. 7 Wave length vs. feed at taper angle of 45°

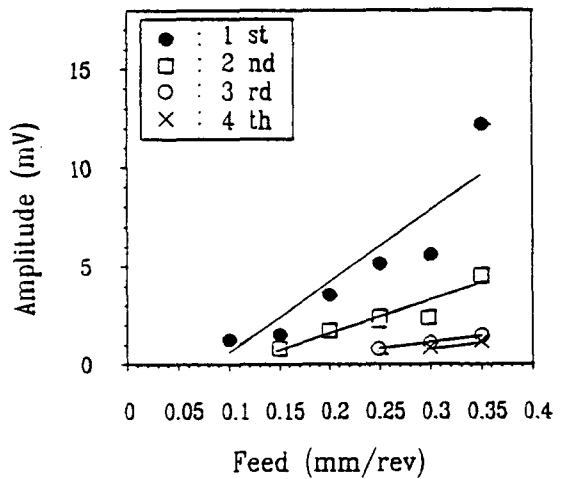


Fig. 9 Amplitude vs. feed at taper angle of 45°

주요 주파수 성분중 가장 주파수가 작은 성분, 즉 가장 波長의 길이가 긴 成分을 첫번째 성분이라 하고, 그다음 크기 차례대로 두번째 성분, 세번째 성분, 네번째 성분이라고 稱하였다. 첫번째 파장성분은 불규칙한 파형중에 가장 週期가 크고 또한 진폭도 가장 큰

성분으로서 그 불규칙한 파형중 가장 큰 영향을 미친다. 이 첫번째 파장의 길이는 移送와 같아지므로 이것은 移送에 의해 발생하는 것임을 알 수가 있고, 또 이 파장의 진폭은 공구 半徑에 의하여 발생하는 것임을 알 수가 있다. 따라서 첫번째 파장성분은 이송과 공

구반경과 같은 確定因子에 의해 발생하는 표면거칠기를 의미한다. 두번째, 세번째, 네번째 파장성분은 확정인자에 의한 파장성분보다 길이와 진폭에서 적으므로 이것들은 構成刃線, 工具의 磨耗, 振動, 凝着物과 같은 불확정인자에 의한 것으로 생각할 수가 있다. 그러나 이 불확정인자에 의한 성분인 두번째, 세번째, 네번째 파장성분들이 각각 이송증가에 따라 어떤 規則性を 띠고 있으나, 이것이 제각기 구성인선, 공구의 마모, 진동, 응착물과 어떤 형태로 연결되는지는 분석할 수 없었다. 대체적으로 이송이 增加함에 따라 불확정인자에 의해 발생하는 파장의 成分 (Length, Magnitude, Number)은 점차로 증가됨을 알 수 있었다. 구체적으로 테이퍼 각도가 45°인 시편에 대해서는 테이퍼 각도가 15°인 시편일 때보다 공구중심과 공구지령선 사이의 차이(b_{max})가 더 크기 때문에 FFT Analyzer를 사용해서 주파수 영역에서 해석해 보면 첫번째 파장 성분(확정인자 성분)의 길이와 진폭은 테이퍼 각도가 15°인 시편의 첫번째 파장성분의 길이와 진폭보다 적어지면서 더 불규칙하다. 한편 두번째, 세번째, 네번째 波長成分(불확정인자 성분)의 길이는 역시 감소하나 振幅은 테이퍼 각도가 15°의 시편보다 더 증가하였다.

4.3 R_{max} 와 FFT Analyzer 出力電壓과의 關係

측침식 표면거칠기 측정기를 통해서 구한 R_{max} 값과 FFT Analyzer에서 출력되는 電壓사이의 關係를 最少自乘法에 의하여 구하였으며, 이에 대한 결과를 각 角度에 대해서 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 보면 角度別 差異는 있지만 R_{max} 와 출력전압사이의 關係는 대체적으로 線形的인 關係가 얻어졌다. 구체적으로 테이퍼 각도가 15°인 시편에 대해서는

$$R_{max}(\mu m) = 0.96X(mV) + 2.90(\mu m)$$

테이퍼 각도가 45°인 시편에 대해서는

$$R_{max}(\mu m) = 0.81X(mV) + 3.18(\mu m)$$

테이퍼 각도가 75°인 시편에 대해서는

$$R_{max}(\mu m) = 0.88X(mV) + 3.56(\mu m)$$

인 關係가 있다. 여기서 X는 FFT Analyzer 出力電壓이다. 그리고 기울기는 출력전압에 대한 R_{max} 感度を 의미하는데 출력전압은 R_{rms} 를 나타내기 때문에 R_{max} 와 R_{rms} 와의 關係를 구할 수 있다. 기울기가 큰 경우 즉, 시험편 각도가 15°일 때는 같은 R_{max} 에 대해 R_{rms} 값은 적은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 테이퍼 각도 15°에서의 頂点を 갖는 성분수는 45°, 75°에 비하여 다소 많으므로 퓨리에 변환에서 각 성분의 진폭제곱의 합에 대한 平方根이 적어지기 때문이라 思料된다.

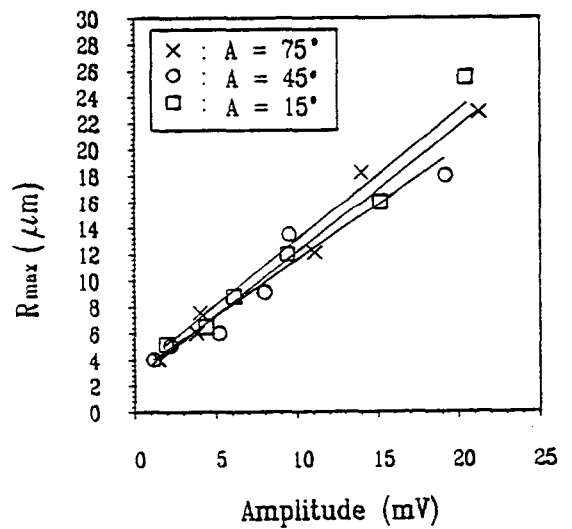


Fig. 10 Surface roughness vs. amplitude

5. 結 論

本 研究는 機械構造物 炭素鋼(SM45C)을 테이퍼 각도 및 이송을 變化시키면서 NC선반 加工하였을 때 加工된 試驗片의 표면거칠기를 FFT Analyzer에 의해서 周波數 分析을 行하여 確定因子와 不確定因子로 區別하였고, 또한 R_{max} 와 R_{rms} 의 相關關係를 誘導하였으며 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) 주파수 영역에서 표면거칠기를 해석함으로써 基本波長을 구할 수 있었으며, 표면거칠기 곡선에 영향을 미치는 確定因子 및 不確定因子를 구별할 수 있었다.
- 2) 이송이 증가함에 따라 不確定因子에 의한 성분들이 많아짐을 볼 수 있었다.
- 3) 축침식 표면거칠기 측정기에서 구한 R_{max} 값과 FFT Analyzer 출력전압 사이에는 상관관계가 존재함으로 출력전압에 의해서도 垂直成分 分析이 가능하였다.

2. 高澤考哉, 研削加工精度, 精密機械, 39卷 2號, 1973. pp. 186-193.
3. Mamoru Ito. Riichi Fukudo, Girung Kim., Some Observations on Factors of Turned Surface Roughness, JSME, Vol 34, No5, 1968. pp. 335-340
4. 中山一雄, Shaw, M. C, 研削仕上面のあらさ, 日本機械學會論文集, 37卷 293號, 1970. pp. 178-186
5. 菊地庄作, 柳澤重夫, 切削의 理論과 實際, 大新技術, 서울, 1986. pp. 115-120.
6. Brock. M, Roughness, Technical Review, No. 3, 1983, pp.3-6.
7. Staufert. G. Description of Roughness Profiles by Separation the Random and Periodic Components, Wear, Vol. 57, 1989, pp. 185-194

References

1. 田中義信, 津和秀夫, 精密工作法(上), 共立出版株式會社, 1974. pp. 4-7.