

# DDS의 이론 및 응용(II)

金光駿 · 李鍾元

<한국과학기술원 · 工博>

## 4. 다변수의 모형화

2.3절에서는 어떤 시스템으로부터 측정된 신호가 하나일 경우에 스토캐스틱 미분 혹은 차등방정식을 유도하는 기법에 대하여 설명하였다. 그러나 하나의 신호만으로는 관심의 대상이 되는 시스템의 특성을 파악하기 힘든 경우가 많다. 더욱 그 시스템에 대한 특성파악목적이 제어일 경우에는 적어도 둘 이상의 신호에 대한 해석이 필요하다. 본 절에서는 변수가 둘 이상인 경우의 모형화 방법을 설명하기로 한다.

다변수일 경우의 미분 혹은 차등방정식을 얻는 방법은 단일변수의 경우와 기본적인 면에서 큰 차이가 없으므로 여기서는 차등방정식을 세우는 방법에 대하여 설명하고자한다. 변수가 하나일 때의 모형이 (2)식에 보인 바와 같은  $USA-M(n, n-1)$ 으로 되듯이 변수의 갯수가  $p$ 일때는 다음과 같이  $ARMAV(n, n-1)$  (Autoregressive Moving Average Vector)모형으로 표시할 수 있다.

$$X_t - \phi_1 X_{t-1} - \phi_2 X_{t-2} - \dots - \phi_n X_{t-n} \\ = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_{n-1} a_{t-n+1} \quad (36)$$

$$E[a_t a_{t-k}] = \delta_k \sigma_a^2, \quad E[a_t] = 0$$

여기서  $X_t$ 와  $a_t$ 는  $p \times 1$ 행 벡터이고  $\phi_k = [\phi_{ijk}]$ 와  $\theta_k = [\theta_{ijk}]$ 는 각각  $p \times p$  자동회귀(autoregressive), 이동평균(moving average)매개변수 행렬이고  $\sigma_a^2$ 도  $p \times p$  행렬로서 분산-공분산(variance-covariance)행렬이다. 주어진 차수  $n$

에 대하여 매개변수  $\phi_{ijk}$ 와  $\theta_{ijk}$ 를 구하는 방법은 단일변수일 경우  $\sum_{t=n+1}^N a_t^2$ 을 최소화하는 것처럼 conditional sum of squares and products(CSP)행렬로 불리는

$$A_0 = \left\{ \sum_{t=n+1}^N a_{it} a_{jt} \right\} \quad (37)$$

의 값(determinant)을 최소화하는 것이다[41]. 이때 비선형최소자승법을 사용하게 되는데, 필요한  $\phi_{ijk}$ 와  $\theta_{ijk}$ 의 초기치들은 ARV(Autoregressive Vector)모형과 역함수를 이용하여 얻게 된다.

적합한 모형을 찾기 위해서는 階수(order)를 계속해 증가시켜 나가면서 통계적인 가정시험(hypothesis)을 근거로 CSP행렬식의 감소가 큰 의미가 없어질 때까지 계속한다. 이 때  $F$ -test를 사용하게 되는데 다음과 같이 하면된다.

$p$ : 변수의 갯수

$N$ : 측정된 자료의 갯수

$r$ :  $p \times$ (높은 차수 모형의 행렬매개변수의 수)

$s$ :  $p \times$ (낮은 차수 모형의 행렬매개변수의 수)

- 낮은 차수 모형의 행렬매개변수의 수)

$A_0$ : 높은 차수 모형의 CSP행렬

$A_1$ : 낮은 차수 모형의 CSP행렬

$$k = N - r - \frac{p-s+1}{2}$$

$$l = \sqrt{\frac{p^2 s^2 - 4}{p^2 + s^2 - 5}}, \quad \lambda = \frac{ps-2}{4}$$

$$A = \frac{|A_0|}{|A_1|}$$

라 할 때

$$F = \frac{(1-A^{\frac{1}{2}}) \cdot (kl-2\lambda)}{A^{\frac{1}{2}} \cdot ps} \quad (38)$$

로 주어지는  $F$  값은 근사적으로  $F(ps, (kl-2\lambda))$  분포를 이룬다. 따라서 주어진 자료로부터 계산한  $F$  값이 미리결정된 수준의  $F$  값보다 작으면 더 이상 찾수를 증가시킬 필요가 없게 된다.

예를 들어 변수의 갯수가 들인(bivariate)AR-MAV(3,2) 모형을 풀어 쓰면 다음과 같고,

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} X_{1t} \\ X_{2t} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \phi_{111} & \phi_{121} \\ \phi_{211} & \phi_{221} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_{1t-1} \\ X_{2t-1} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \phi_{112} & \phi_{122} \\ \phi_{212} & \phi_{222} \end{pmatrix} \\ & \begin{Bmatrix} X_{1t-2} \\ X_{2t-2} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \phi_{113} & \phi_{123} \\ \phi_{213} & \phi_{223} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_{1t-3} \\ X_{2t-3} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} a_{1t} \\ a_{2t} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \theta_{111} & \theta_{121} \\ \theta_{211} & \theta_{221} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} a_{1t-1} \\ a_{2t-1} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \theta_{112} & \theta_{122} \\ \theta_{212} & \theta_{222} \end{pmatrix} \\ & \begin{Bmatrix} a_{1t-2} \\ a_{2t-2} \end{Bmatrix} \quad (39) \end{aligned}$$

$$A_0 = \begin{pmatrix} \sum a_{1t}^2 & \sum a_{1t}a_{2t} \\ \sum a_{1t}a_{2t} & \sum a_{2t}^2 \end{pmatrix}$$

ARMAV(2,1) 모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} X_{1t} \\ X_{2t} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \phi_{111} & \phi_{121} \\ \phi_{211} & \phi_{221} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_{1t-1} \\ X_{2t-1} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \phi_{112} & \phi_{122} \\ \phi_{212} & \phi_{222} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_{1t-2} \\ X_{2t-2} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} a_{1t} \\ a_{2t} \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} \theta_{111} & \theta_{121} \\ \theta_{211} & \theta_{221} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} a_{1t-1} \\ a_{2t-1} \end{Bmatrix} \\ & A_1 = \begin{pmatrix} \sum a_{1t}^2 & \sum a_{1t}a_{2t} \\ \sum a_{1t}a_{2t} & \sum a_{2t}^2 \end{pmatrix} \quad (40) \end{aligned}$$

이 때의  $F$  값은

$$p=2, r=2 \times 5, s=2 \times 2$$

$$k = N - 10 - \frac{2-4+1}{2} = N - 9.5$$

$$l = \sqrt{\frac{4 \cdot 16 - 4}{4 + 16 - 5}} = 2, \lambda = \frac{2 \cdot 4 - 2}{4} = 1.5$$

$$kl - 2\lambda = 2N - 22$$

로부터

$$F = \frac{(1-A^{\frac{1}{2}}) \cdot (2N-22)}{A^{\frac{1}{2}} \cdot 8}$$

이 되며,  $F(8, 2N-22)$ 를 따른다.

(39)식이나 (40)식에 보여준 2변수 ARMAV 모형에 사용된 자료가 이 시스템의 입·출력이

라 한다면, 모형화에 사용된  $a_{1t}$ 와  $a_{2t}$ 는 입·출력의 측정시에 첨가된 잡음을 특성화 하는데 쓰였다고 볼 수 있다. 이와 같은 2변수

ARMAV 모형이 단일입력-단일출력시스템의 모형화에 쓰이고 있는 다른 방법들[18]과의 가장 근본적인 차이점은,

첫째, 대부분의 다른 방법들은 출력에 관계된 잡음만을 고려의 대상에 넣은 반면 2변수 ARMAV 모형은 입력과 출력 모두에 대한 잡음의 영향을 고려했고,

둘째, 입·출력을 표현하는 가장 기본단위인  $a_{1t}$ 와  $a_{2t}$ 가 단독적으로는 제각기 독립적이지만 즉,

$$E[a_{1t}a_{1t-k}] = \delta_k \sigma_{1a}^2, E[a_{2t}a_{2t-k}] = \delta_k \sigma_{2a}^2$$

이지만, 이들 서로간에는 반드시 독립적, 즉  $E[a_{1t}a_{2t-k}] = 0$ , 라는 가정을 하지 않았다는 점이다. 따라서 모형화 하는데 필요한 가정이 다른 어떤 모형화 방법에 있어서의 가정보다도 일반적이라고 볼 수 있다. 또한 가지 2변수 ARMAV 모형화 기법의 특징은 출력으로부터 입력으로의 피이드백이 있는지 없는지, 있다면 그것을 자동적으로 정성적·정량적으로 파악할 수 있다는 것이다. 즉 위의 (40)식에서  $X_{1t}$ 를 입력이라고  $X_{2t}$ 를 출력이라 할 때,  $\phi_{121}, \phi_{122}, \theta_{121}$ 의 산정된 값들이 0에 가깝고 신뢰도구간이 0을 포함한다면 피이드백이 없는 것을 나타내주는 것이고 그렇지 않은 경우라면 그들이 피이드백의 정량적·정상적인 특성을 나타내준다.

### 5. 예측(Forecasting) 및 제어(Control)

관측된 자료의 시계열 모형화의 궁극적인 목적은 예측이며, 예측의 목적은 정책의 결정(decision making) 또는 기계 제 및 공정(process)의 제어라 할 수 있다. 예측기법은 오래전부터 경영분야나 산업분야에서 많이 응용되어 온 반면 공학분야에의 응용은 비교적 역사가 짧다. 이 절에는 주로 기계 제어의 응용을 다루기로 하며 간단한 모형을 예로 설명하고자 하고 난해한 기술은 피하기로 한다.

예측기법은 시간  $t$ 에서의 조건부 기대치(conditional expectation)  $E_t$ 를 도입하여

$$EX_{t+i} = \hat{X}_t(i) \quad (41)$$

즉, 시간  $t$ 를 기준하여 과거의 자료가 주어진 조건하에서의  $l$ 스텝전방기대치는  $l$ 스텝전방예측치( $l$ -step ahead forecasting)와 같게 된다는 관계를 기본으로 하며 이와 관련된 기본 규칙(rule)은

1. 현재 또는 과거의 자료에 대한 조건부 기대치는 주어진 해당 자료의 값과 같다.
2. 미래의 자료에 대한 조건부 기대치는 그 예측치와 같다.
3. 현재 또는 과거의 잡음( $a_t$ )에 대한 조건부 기대치는 주어진 또는 계산될 수 있는 해당잡음과 같다.
4. 미래의 잡음에 대한 조건부 기대치는 영이다.

4번의 규칙은  $a_t$ 가 평균값이 영인 정상분포를 갖는 독립변수라는 데서 미래의  $a_t$ 에 대한 최적의 예측은 영이라는 사실에서 쉽게 이해할 수 있다. 위의 규칙들을 순서대로 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} E_t(X_{t-j}) &= X_{t-j}, \quad j=0, 1, 2, \dots \\ E_t(X_{t+i}) &= \hat{X}_t(i), \quad j=1, 2, 3, \dots \\ E_t(a_{t-j}) &= a_{t-j}, \quad j=0, 1, 2, \dots \\ E_t(a_{t+i}) &= 0, \quad j=1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (42)$$

예를 들어 AR(1)모형인

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + a_t \quad (43)$$

의 경우 2스텝 전방예측치는 (41), (42) 식을 (43)식에 적용하여

$$\begin{aligned} \hat{X}_t(2) &= E_t(X_{t+2}) = E_t(\phi_1 X_{t+1} + a_{t+2}) \\ &= \phi_1 E_t(X_{t+1}) + E_t(a_{t+2}) \\ &= \phi_1 E_t(\phi_1 X_t + a_{t+1}) \\ &= \phi_1^2 X_t \end{aligned} \quad (44)$$

마찬가지 방법으로  $l$ 스텝전방예측치는

$$\hat{X}_t(l) = \phi_1^l X_t \quad (45)$$

가 됨을 쉽게 구할 수 있으며 일반모형인 AR-MA( $n, n-1$ )의 경우도 같은 방법으로 예측할

수 있다[2]. 한편  $X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots$ 가 주어진 경우,  $X_{t+i}$ 에 대한 조건 분포(conditional distribution)는

$$\begin{aligned} p(X_{t+i}/X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots) &\sim ND[\hat{X}_t(i), \\ &\sigma_a^2(1+G_1^2+G_2^2+\dots+G_{i-1}^2)] \end{aligned} \quad (46)$$

이 되며 예측치에 대한 95% 확률한계(probability limit)는

$$\hat{X}_t(i) \pm 1.96 \sigma_a (1+G_1^2+G_2^2+\dots+G_{i-1}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (47)$$

이 된다. 여기서 ND( $u, v$ )는 평균이  $u$ 이고 분산이  $v$ 인 정상분포(normal distribution)를 이룬다. (43) 식의 AR(1)모형의 경우,

$$\begin{aligned} p(X_{t+2}/X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots) &\sim ND[\hat{X}_t(2), \sigma_a^2 \\ &(1+\phi_1^2)] \end{aligned} \quad (48)$$

이 되며 95% 확률한계는

$$\phi_1^2 X_t \pm 1.96 \sigma_a \sqrt{1+\phi_1^2} \quad (49)$$

이 된다.

제어를 위해서는 단일변수 모형이 아닌 다변수 모형을 이용하게 되는데 4절의 (36) 식으로 주어지는 ARMAV( $n, n-1$ ) 모형이 가장 일반적인 다변수모형이다. 편의상 (40)식에서  $\theta_1=0$ 으로 주어지는 간단한 이변수(bivariate) ARMAV(2, 0) 모형, 즉 ARV(2)를 예로써 설명하기로 한다. 우선  $X_{1t}$  제어입력변수,  $X_{2t}$ 를 제어하고자하는 출력이라하면 원인-결과(causality)의 관점에서 ARV(2) 벡터모형을 2개의 스칼라(scalar) 식으로 분해하는 경우, 다음식만이 제어에 사용될 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} X_{2t} &= \phi_{221} X_{2t-1} + \phi_{222} X_{2t-2} + \phi_{211} X_{1t-1} \\ &\quad + \phi_{212} X_{1t-2} + a_{2t} \end{aligned} \quad (50)$$

일반적으로 기계 제어에서는 제어하고자 하는 출력  $X_{2t}$ 가 원하는 일정한 값을 유지해야 하는데 이는 동적(dynamic)자료로 처리된 모형에서는 0이 되도록 하는 것과 같다. 진동계의 경우 제어의 진동을 감소시켜 궁극적으로는 0이 되도록 하는 것이 제어의 목적이 된다. 일반적인 디지털 제어방식에서는 1스텝전방예측을 0으로 하는 제어입력을 계산하는데 이를 (50)식에 적용하면

$$\hat{X}_{2t}(1) = 0 = E_t(X_{2t+1}) = \phi_{221} X_{2t} + \phi_{222} X_{2t-1}$$

$$+\phi_{211}X_{1t}+\phi_{212}X_{1t-1} \quad (51)$$

따라서 시간  $t$ 에서의(엄밀한 의미에서는  $X_{2t}$  직후)제어입력식은

$$X_{1t} = -\frac{1}{\phi_{211}}(\phi_{221}X_{2t} + \phi_{222}X_{2t-1} + \phi_{212}X_{1t-1}) \quad (52)$$

단약 입력과 출력사이에 2스텝시간지연이 있는 경우에는

$$X_{2t} = \phi_{221}X_{2t-1} + \phi_{222}X_{2t-2} + \phi_{211}X_{1t-2} + \phi_{212}X_{1t-3} + a_{2t} \quad (53)$$

의 모형으로 부터

$$\begin{aligned} \hat{X}_{2t}(2) = 0 &= \phi_{221}\hat{X}_{2t}(1) + \phi_{222}X_{2t} + \phi_{221}X_{1t} \\ &+ \phi_{212}X_{1t-1} \\ &= \phi_{221}(\phi_{221}X_{2t} + \phi_{222}X_{2t-1} + \phi_{211}X_{1t-1} \\ &+ \phi_{212}X_{1t-2}) + \phi_{222}X_{2t} + \phi_{221}X_{1t} \\ &+ \phi_{212}X_{1t-1} \end{aligned} \quad (54)$$

따라서

$$\begin{aligned} X_{1t} = -\frac{1}{\phi_{211}} [ &(\phi_{221}^2 + \phi_{222})X_{2t} + \phi_{221}\phi_{222}X_{2t-1} \\ &+ (\phi_{221}\phi_{211} + \phi_{212})X_{1t-1} + \phi_{221}\phi_{212}X_{1t-2} ] \end{aligned} \quad (55)$$

의 제어식을 얻게 된다. 입력과 출력사이에  $l$ 스텝시간지연이 있는 경우나  $l$ 스텝전방예측이 요구되는 경우에도 유도과정이 복잡해질뿐 같은 방법으로 제어식을 유도해 낼 수 있다.

삼변수이상의 ARMAV 모형의 응용은 이론적으로는 가능하나 모형화과정 및 제어식유도과정에 어려움이 많아 실제 효과적으로 이루어지고 있지 않으나 ARV 모형을 이용한 제어는 시도되고 있다. 이변수 ARMAV 인 경우에는 모형과정 및 제어식 유도과정이 비교적 용이하나, 이 동평균계수가 관계되면  $a_{1t}$ 와  $a_{2t}$ 의 독립관계등의 근본적인 문제가 제기되며, 설사 이변수ARV 모형으로 모형화 한다하더라도 결정된 모형으로부터 유도된 제어식의 안정성 문제를 확인해야 한다. 이러한 모형화과정에서의 문제점이 있음에도 불구하고, 일단 적합한 모형이 설정되면 디지털 컴퓨터에 의한 온라인 제어에 용이하게 적용할 수 있을 뿐만아니라, 예측제어방식을 채택함으로써 인해서 제어성능도 재래방법에 비해

우수함이 입증되고 있다.

## 6. 응용 예

지금까지 소개된 단일변수 혹은 다변수일 때의 DDS 모형화기법은 상당히 넓은 분야에 걸쳐 응용되어 왔는데 대별해 보면 다음과 같다.

- 공작기계 작업과정의 파악 (machining process identification)
- 표면거칠기의 특성화 (surface profile characterization)
- 닫힌 루우프 시스템의 특성해석 및 제어 (closed-loop system identification and control)
- 공작기계구조물의 동적 특성해석 (machine tool structural dynamics identification)
- 공구수명의 탐지(tool life monitoring)
- 안정성해석 및 진단 (stability analysis and diagnostic malfunction detection)
- 동적보정(dynamic calibration of instrumentation)
- 기타(others)

본 절에서는 위의 각 분야에 있어서 DDS 방법론이 여러 공학적인 문제의 해결에 어떻게 응용되고 있는지 최근까지 여러 학회지에 발표된 논문들을 인용하여 설명하고자 한다.

### 6.1. 공작기계 작업과정의 파악

여기서 작업과정(machining process)이라 함은 단순한 절삭과정(cutting process)과 공작기계의 구조적 동특성(structural dynamics characteristics)이 복합된 상태를, 즉 실제의 작업상태를 의미한다. 이 작업과정에 대한 연구는 영국의 Tobias, 캐나다의 Tlusty, 독일의 Opitz 등을 비롯한 공작기계 전문가들에 의해 과거 20년 동안 상당히 진척되어 왔지만 [19, 20, 21], 그들 각각의 연구방향과 실험결과들이 반드시 일치한 것은 아니었다. 그들 공통의 연구방법론

은 공작기계의 작업과정을 동절삭과정(dynamic cutting process)과 구조물의 특성해석을 분리시켜 행하는 것인데, 그 해석에 동원된 가정은 상당히 많고 접근방법은 상당히 복잡하다. 그러한 많은 가정과 해석방법의 복잡성을 떠나서, 실제작업중에 정밀하게 측정된 절삭력이라던지 공구와 시편사이의 상대변위가 그 작업과정의 특성을 충분히 반영하고 있으리라는 개념을 토대로 측정된 실험자료해석에 DDS 방법론의 단일변수모형을 적용시켜 본 것이다[11, 22, 23, 24, 25, 26].

처음 발표된 [11]에서는 선삭작업에서 일어나는 chatter를 자려진동으로 보아 2절에서 소개한  $A(2n)$  혹은  $AM(2n, 0)$ 모형을 공구선단의 진동신호에 적용시켰다. [22]에서는 세워진 모형들의 안전성을 논하고 세워진 모형들로부터의 스펙트럼을 여러가지 절삭현상, 즉, 심한 chatter, 중간급의 chatter, 안정절삭등에 대하여 비교하였는데, chatter가 심해짐에 따라 그에 해당하는 모형들의 특성해 혹은 매개변수의 값들이 안정성 경계에 가까와짐을 보인다.

[23]에서는 한 걸음 더 나아가 face milling작업에서 시편과 공구사이의 상대변위를 여러 절삭조건(절삭속도 및 피이드)에서 측정, 모형화하고, 특성해를 구하여 안정성차트(stability chart)를 구성하였다. 또한 구해진 스토캐스틱 미분방정식을 분해하여(decompose) 절삭동특성과 구조적동특성 각각을 파악 하고있다. [24, 25]에서는 DDS 방법론에 따른 단일변수모형화기법

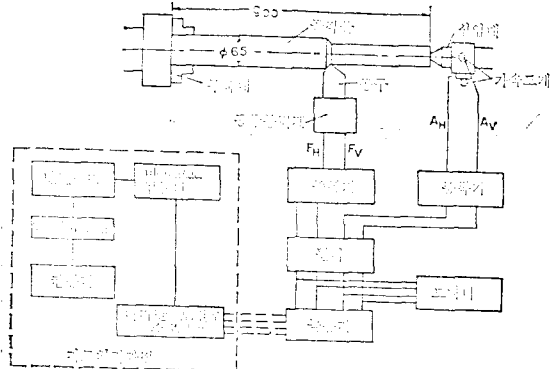


그림 4 절삭 실험장치 및 자료처리 과정

을 사용하되 chatter에 해당하는 모우드만을 모형화하기 위해 필터(filter)를 사용함으로써, 마이크로프로세서를 이용한 온라인으로의 chatter발생 예측가능성을 제시하고 있다.(실험장치: 그림 4 참조) 이 때 chatter발생과 관련되어 사용된 인자는 해당 모우드의 감쇠율이라는 것이 주의할 만하다 [26]에서는 밀링작업의 특성을 절삭토크(torque)를 측정·모형화 함으로써 분석 하였는데 결론은 [22, 23, 24]에서 유도된 것들과 비슷하다.

이상의 내용들에 대하여 검토해보면, 공작기계 작업과정에서 발생하는 chatter로 인한 불안정성은 시편과 공구사이에 발생하는 진동신호 혹은 절삭력을 단일변수 모형화하고, 특성해를 구함으로써 해석 및 예측이 가능 하리라고 본다. 그러나 [22, 23]에서 처럼 하나의 신호만을 처리하여 얻은 모형으로부터 동절삭특성과 구조물의 동특성을 분리하여 파악할 수 있다는 제안은 좀더 연구가 되어야 된다고 보여진다.

선반작업시 chatter 발생의 예측을 위해서[27]에서는 절삭력뿐만 아니라 심압대 및 공구대의 가속도 신호를 절삭작업중 측정하여 처리한 결과 USAM(8, 7)에서 USAM(10, 8) 정도의 모형이 적합함을 보이고 이로부터 구해진 PSD로부터 절삭시 공작기계 각 주요 요소의 동특성의 변화를 분리·해석할 수 있을 뿐 아니라 chatter의 발생이 모든 신호로부터 효과적으로 감지될 수 있음을 보이고 있다. 한편 [28]에서는 나사절삭 작업시 이송대의 이송방향 진동이 절삭조건 변화에 따른 공작기계 계의 동특성의 변화를 특성화 하는데 이용될 수 있음을 보인다.

## 6.2. 표면거칠기의 특성화(Surface Profile Characterization)

단일변수모형이 응용되기 가장 적절한 분야중의 하나가 이 분야인 것으로 생각된다. 왜냐하면 랜덤한 양상을 띤 표면거칠기(surface profile)의 특성을 묘사하기 위한 종래의 방법이 평균값(center line average: CLA)과 공분산을 주어진 자료로부터 계산하는 것이던 반면에, 2절에서 보인 바와 같이 AM 혹은 ARMA 모형

은 그 값들을 명료하게(explicitly) 산출할 뿐만 아니라 그 외의 여러특성도 나타낼 수 있기 때문이다. 그런 이유에서 DDS 방법론의 개발이전에 단일변수모형이 응용된 것도 이 분야인 것이다.

초창기에 발표된 논문들인 [29, 30]에서는 연삭공구의 거칠기, 밀링작업을 행한표면의 거칠기등에 대하여 단일변수모형을 세웠는데, 이 때 사용된 방법론은 2절에 소개된 내용이 아닌 Box and Jenkins의 ARMA 모형화 기법이었다. 이 논문들에서는 seasonal ARMA 모형을 사용하여 CLA와 공분산값과 더불어 waviness, roughness, errors of form(그림 5 참조)등도 산출할 수 있음을 보여주고 있다.

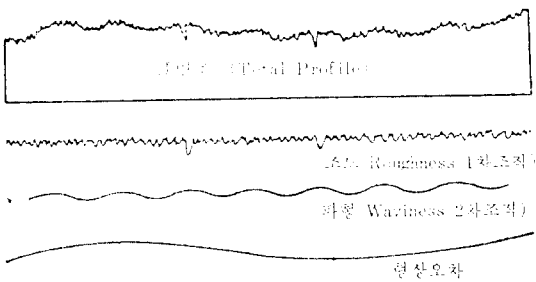


그림 5 표면조도의 기본구성 요소

그 후 발표된 [31, 32]에서는 연삭공구표면입자(Grain)들의 기하학적 특성 및 마모특성의 파악에 2절에 소개된 모형화기법을 사용하였는데 이 때 처음으로 고유진동수와 감쇠율 등의 개념이 도입되었다. 그러나 2절의 일반적인 AM(n, n-1)모형을 사용한 것이 아니라 AM(2, 0)에 불과했기 때문에 엄밀한 의미에서 측정된 자료의 특성을 충분히 반영했다고 보기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 표면입자들의 apex angle, base width, orientation 등의 기하학적 성질과 마모특성까지 해석하려했다는 점에서 어느 정도의 의미를 부여할 수 있다고 보인다. 또한 재래의 연삭숫돌 표시법에 사용된 제질, 입도, 경도, 조직, 접결제 등의 제조면에서의 기술(description)을 탈피하여 사용자가 쉽게 이해할 수 있는 분산, 감쇠율, 고유진동수 등의 표면거칠기의 특성에 의한 표시법(그림 6 참조)을 창안해낸 점은

특기할 만하다[31, 32]. 한가지 더 붙이고 싶은 것은 이 무렵에 이르러서 Box and Jenkins의 모형화기법을 떠나 DDS 방법론의 초석을 다지기 시작했다는 점인데, 그 두 방법론의 근본적인 차이점은 2절에 설명한 바와 같다.

[34, 35]에서는 이방성의(anisotropic)의 랜덤

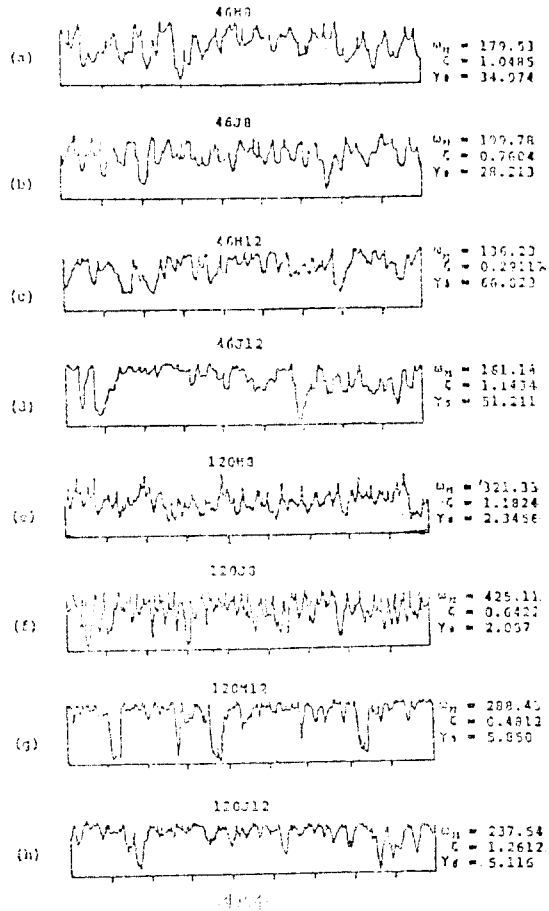


그림 6 연삭숫돌 조도(profile)와 특성계수

성을 지닌 코팅된 abrasive paper의 프로파일과 종이의 두께특성을 파악하기 위해 2차원적으로 자료를 측정한 다음, 그 각각에 2절의 방법론을 적용하여 세워진 모형으로부터 나온 spectral moments로부터, 표면거칠기에 대해서는 density of summits, maximum slope, principal direction 등의 기하학적 특성을 찾아내기도 했

고, flock의 평균치와 최대치로 표시되는 종이의 조직특성을 찾아내기도 하였다.

가공표면의 조도를 정량적으로 표시하려는 노력도 많았는데 그 중 [36]에서는 방전가공된 시편의 표면조도를 측정하여 AM(1,0)모형으로 모형화 하였으며 이 모형의 계수로 부터 방전가공시 시편 표면에 생기는 crater의 모형을 구체화 시켜 이로부터 가공량의 정량분석에도 응용하고 있다. 절삭조건의 변화에 따른 표면조도의 정량화를 목적으로 [37]에서는 방전가공된 표면(그림 7참조)조도를 AM(2,0)으로 모형화 하였고



그림 7 방전가공 시편의 표면 ( $\times 40$ ) 5000 Hz, 3A,  $1\mu F$ .

이로부터 결정된 특성계수를 1자유도 감쇠진동계와 관련시켜 해석하였으며 이 결과를 수표화했다. 이러한 기술은 방전가공뿐 아니라 선삭, 연삭등에 의한 가공표면의 조도를 정량화하는데 이용되기도 한다[38]. (다음호에 계속)

참 고 문 헌

18. Eykhoff, P., Trends and Progresses in

System Identification, Pergamon Press, 1981.  
 19. Tobias, S.A., Machine Tool Vibration, J. Wiley & Sons, 1965.  
 20. Koenigsberger, F. and Tlustý, J., Machine Tool Structures, Pergamon Press, 1970.  
 21. Opitz, H. and Weck, M., "Determination of the Transfer Function by Means of Spectral Density Measurements and its Application to the Dynamic Investigation of Machine Tool Under Machining Conditions," Proc. of the 10th M.T.D.R. Conf., 1969, pp. 349-378.  
 22. Pandit, S.M., Subramanian, T.L., and Wu, S. M., "Modeling Machine Tool Chatter by Time Series," Trans of ASME., J. of Eng. for Industry, Feb. 1975, pp. 211-215.  
 23. Burney, F.A., Pandit, S.M., and Wu, S. M., "A Stochastic Approach to the Analysis of Machine Tool System Stability Under Working Conditions," Trans. of ASME, J. of Eng. for Industry, Vol. 98, 1975, pp. 614-619.  
 24. Eman, K.F., "Machine Tool System Identification and Forecasting Control of Chatter," Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Eng., Univ. of Wisconsin-Madison, 1979.  
 25. Eman, K.F. and Wu, S.M., "A Feasibility Study of On-Line Identification of Chatter in Turning Operations," Trans. of ASME, J. of Eng. for Industry, Vol. 102, Nov. 1980, pp. 315-321.  
 26. Shuaib, A.R.N., Garcia-Gardea, E., and Wu, S.M., "Dynamic Analysis of Milling Machine by Torque Signals," Trans. of ASME., J. of Eng. for Industry, Vol. 103, 1981, pp. 235-240.  
 27. 변승완, 이종원, "DDS 방식에 의한 공작기계 절삭 특성 규명" 대한기계학회 논문집 제 5권 제 4호, 1981, pp. 303-311.

28. 조영호, "공작기계 이송기구의 진동이 절삭에 미치는 영향, 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 1982.
29. Stralkowski, C.M., Wu, S.M., and Devor, R.E., "Characterization of Grinding Wheel Profiles by Autoregressive-Moving Average Models," Int'l J. of MTDR, Vol. 9, 1969, pp. 145-163.
30. Devor, R.E. and Wu, S.M., "Surface Profile Characterization by Autoregressive Moving Average Models," Trans. of ASME, J. of Eng. for Industry, 1972, pp. 825-832.
31. Pandit, S.M. and Wu, S.M., "Characterization of Abrasive Tools by Continuous Time Series," Trans. of ASME, J. of Eng. for Industry, 1973, pp. 821-826.
32. Phadke, M.S., Burney, F.A., and Wu, S.M., "Evaluation of Coated Abrasive Grain Geometry and Wear Via Continuous Time Series Models." Wear, Vol. 31, 1975, pp. 29-38.
33. Nassirpour, F., and Wu, S.M., "Characterization and Analysis of Grinding Wheel Topography as a Stochastic Isotropic Surface," J. Eng. for Industry, Vol. 101, 1979, pp. 165-170.
34. Pandit, S.M., Nassirpour, F., and Wu, S.M., "Stochastic Geometry of Anisotropic Random Surfaces With Application to Coated Abrasives," Trans. of ASME, J. of Eng. for Industry, 1977, pp. 218-224.
35. Tee, L.H. and Wu, S.M., "An Application of Stochastic and Dynamic Models for the Control of a Papermaking Process," Technometrics, Vol. 14, No. 2, 1972, pp. 481-496.
36. Pandit, S.M. and Rajurkar, K.P., "A Mathematical Model for Electro-discharge Machined Surface Roughness," Proc. of the North American Metal Working Research Conference, VI, 1978, pp. 339-345.
37. 신홍열, "시계열 방법에 의한 방전 가공된 표면의 조도해석" 한국과학기술원 생산공학과 석사학위논문, 1982.
38. Pandit, S.M., "Characteristic Shapes and Wavelength Decomposition of Surfaces in Machining," Annals of the CIRP, Vol. 30, No. 1, pp. 487-492.

