

가감속 형태에 따른 운동오차의 영향에 대한 연구

A Study on the Effects of Motion Errors for Acceleration/ Deceleration Types

신동수* (화천기공(주)), 광경남 (화천기공(주)), 정성종 (한양대 공대)

D. S. Shin, K. N. Kwak (Hwacheon Machine Tools Co., Ltd), S. C. Chung (Hanyang Univ.)

ABSTRACT

This paper proposes a study on the effects of motion errors for acceleration/ deceleration types. The proposed motion errors are consisted of two errors : one due to transient response of servomechanism and the other due to gain mismatching of positioning servo motor. They are derived from using laplace transformation for the block diagram of general purpose feed drive system. In order to minimize them, the paper proposes second order polynomial regression model by using orthogonal array method which describes one of experimental methodologies. The validity and reliability of the study was verified on a vertical machining center equipped with FANUC OMC through a series of experiments and analyses.

Key Words : motion control (운동제어), acceleration/ deceleration (가감속), linear type (직선형), exponential type (지수형), bell type (벨형), laplace transformation (라플라스 변환), orthogonal array method (직교배열법)

1. 서 론

공작기계, 마이크로 전기적 제조장비 및 자동집석 기계와 같은 현대의 기계적 시스템은 강건성, 고속 및 고정도 위치, 트래킹 성능을 갖는 모션 제어기에 의존하고 있다.⁽¹⁾ 서보 모터의 위치제어 기술도 하드웨어 방식에서 소프트웨어 방식으로 변화하고 있으며, 현재 산업계에서 이용되는 로봇이나 제어장치들의 위치제어 방식은 대부분은 펄스열로서 위치 명령을 주는 하드웨어 방식을 취하고 있다.⁽²⁾

이와같이 하드웨어적으로 위치제어를 하는 경우 서보모터에 부착된 부하의 변화에 따라 적절히 대응할 수 없는 단점이 있다. 또한, 서보모터의 가감속 페턴을 어떠한 곡선으로 하느냐에 따라 다축 공작기계 및 로봇의 운동을 진동없이 구동시킬 수 있는가에 대한 연구가 이루어지고 있으며 SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) 로봇을 개발한 H. Makino 교수는 CAM 곡선인 NC2 곡선을 가감속 곡선으로 이용하였다.⁽³⁾ Koren 등은 수치제어 시스템을 Point-To-Point (PTP) 형태와 Contouring (혹은 Continuous - Path) 형태로 구분하여 제어기의 오차성분을 제거하여 진보된 제어기를 설계하는 알고리즘을 제안하였다.⁽⁴⁾

또한 지수형, 직선형 및 벨형 가감속 형태에 따른 이산 시간 상태방정식의 연산에 의해 위치정도를 계산하고 샘플링 시간을 줄여 고속, 고정도의 위치제어가 가능한 방법에 대해 해석적인 가감속 페턴과 실험적인 가감속 페턴과의 비교를 연구하였다⁽⁵⁾.

국내외의 연구현황을 통하여 서보계의 가감속 페턴과 서보 파라미터의 최적선택은 서보계의 추종오차값을 최소화하며 원호보간에 따른 형상오차를 최소화하는 중요한 문제로 인식되었다.

따라서 본 논문에서는 이송계 서보 블록의 시정수와 관련된 파라미터와 이송속도, 반경 및 모티와 테이블의 관성비등이 고속 및 고정도의 위치제어에서 중요한 역할을 수행하고 있음을 실험적으로 입증하였다. 또한, 서보의 추종오차값을 최소화하여 원호반경의 형상오차값을 최소화하였다. 직교배열법의 효율적 실험계획과 함께 2 차 다항회귀모형화⁽⁶⁾를 통해 목적함수의 추정방정식과 실험인자의 수준에 따른 최적조건을 제시하였다.

2. 일반 이송계의 서보 블록 및 해석

2.1 기존 가감속 회로⁽⁵⁾

Fig. 1 은 일반적으로 위치명령을 펄스열 (Pulse train) 입력으로 수행하는 위치제어 시스템을 나타내는 것으로 위치는 발생된 펄스수로 제어하고 속도는 발생된 펄스의 주파수로 제어되며, 위치제어는 하드웨어에 의해 실현한다. f_i 와 f_o 의 관계를 라플라스변환과 z 변환을 이용하여 이산시간 상태방정식을 구축하고 반복적인 수식형태⁽⁵⁾로 표현한다. Fig. 2 는 실험에 의한 실제 속도 대 시간 측정값이다.

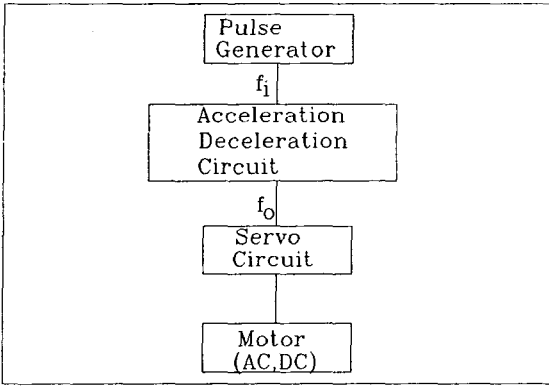


Fig. 1 Position control system (input values : pulse train).

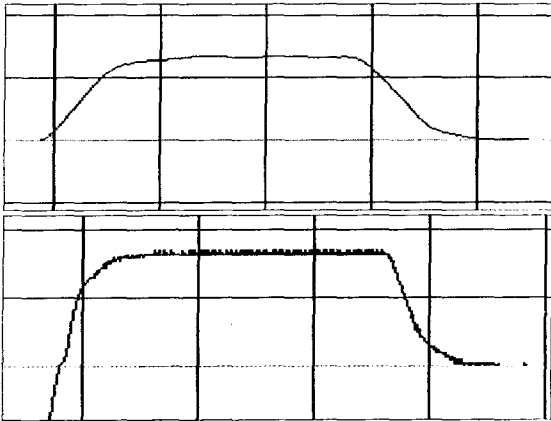


Fig. 2 Linear and exponential types for acceleration / deceleration (v - t diagram).

2.2 일반 이송계 서보 블록

Fig. 3 은 지령궤적과 실제 궤적사이의 오차를 보여준 그림이다. 이때의 R 은 입력값이 되며 F 는 이송속도 (Feedrate) 가 된다. 또한, ΔR 은 원호반경의 형상오차값을 나타내며 이 값은 서보 loop 지

연 오차와 시정수의 불일치에 따른 오차를 보여준다. 형상오차 ΔR 는 식 (1) 로 나타낼 수 있다.

$$\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2 \quad (1)$$

여기서, ΔR_1 은 서보 loop 지연오차이며 ΔR_2 는 시정수의 불일치에 따른 오차이다.

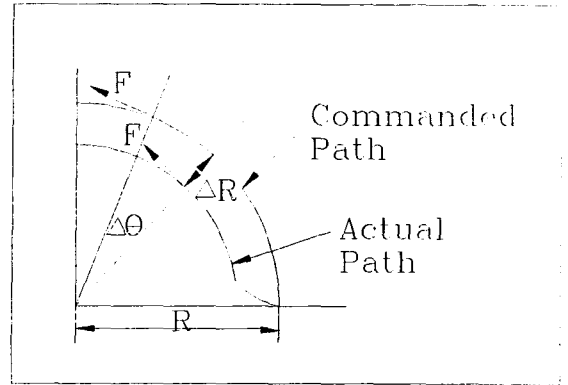


Fig. 3 Tool paths for circular machining.

Fig. 4 는 일반적 이송제어계의 블록선도이다. 그림에서 표시된 것과 처럼 위치정보를 피드백 (feedback) 하는 제어계에 대하여 생각하자. 여기서 ΔR 를 유도하기 위하여 초기상태 및 입력신호는 다음 식 (2) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_i(0) &= R, \\ \frac{d}{dt} X_i(0) &= 0, \\ X_i(t) &= R \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

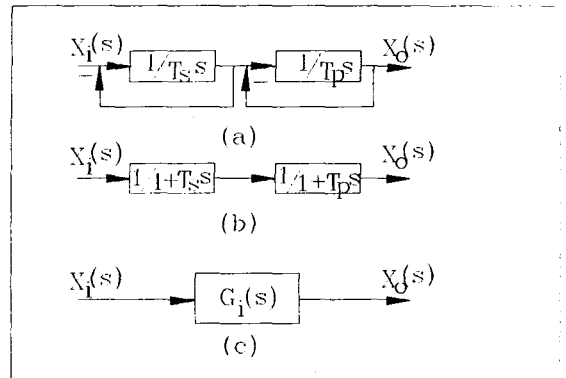


Fig. 4 A block diagram for feed control system.

Smoothing 회로의 시정수 T_s , 서보부분의 시정

수를 T_p 라 하고 이에 따른 블록전도를 표시하는 전달함수 $G_i(s)$ 는 피드백 부분을 제거하면 Fig. 4 (b) 와 같이 식 (3) 으로 표현된다.

$$G_i(s) = \frac{1}{1+T_s s} \cdot \frac{1}{1+T_p s} \quad (3)$$

Fig. 4 (c) 에 의하여 식 (4) 와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_o(s) &= G_i(s) \cdot X_i(s) \\ &= \frac{1}{1+T_s s} \cdot \frac{1}{1+T_p s} \cdot \frac{R \cdot s}{s^2 + \omega^2} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4) 를 라플라스 역변환하면 식 (5) 와 같다.

$$x_o(t) = R(A \cdot e^{-\frac{t}{T_s}} + B \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + C \cos \omega t + D \sin \omega t) \quad (5)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{1}{\omega^2 + \frac{1}{T_s^2}} \cdot \frac{1}{T_s} \cdot \frac{1}{T_p + T_s} \text{ 이고,}$$

$$B = \frac{1}{\omega^2 + \frac{1}{T_p^2}} \cdot \frac{1}{T_p} \cdot \frac{1}{T_s - T_p} \text{ 이며,}$$

$$C = \frac{1/T_s T_p \cdot (1/T_s T_p - \omega^2)}{(\omega^2 + 1/T_p^2)(\omega^2 + 1/T_s^2)} \text{ 이고,}$$

$$D = \frac{\omega + T_s T_p \cdot (1/T_s + 1/T_p)}{(\omega^2 + 1/T_p^2)(\omega^2 + 1/T_s^2)} \text{ 이다.}$$

정상상태의 오차를 구하기 위하여 $t \rightarrow \infty$ 로 보이면 $e^{-t/T_s} = 0, e^{-t/T_p} = 0$ 이 된다. 코사인과 사인의 합차공식에 의하여 식 (5) 를 식 (6) 과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$x_o(t) = R' \cos(\omega t - \psi) \quad (6)$$

여기서,

$$R' = R[(T_s^2 \omega^2 + 1)(T_p^2 \omega^2 + 1)]^{-\frac{1}{2}} \text{ 이고}$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{\omega(T_s + T_p)}{1 - T_s T_p \omega^2} \text{ 이다. Fig. 3 에서 원호}$$

변경의 형상오차 ΔR 는 식 (7) 과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta R &= R' - R \\ &= R\{-1 + [(T_s^2 \omega^2 + 1)(T_p^2 \omega^2 + 1)]^{-\frac{1}{2}}\} \quad (7) \end{aligned}$$

식 (7) 을 간단히 하기 위하여 Euler 공식을 이용하여 식 (8) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R = \frac{-1}{2R} (T_s^2 + T_p^2) F^2 \quad (8)$$

여기서 $T = \frac{2\pi R}{F} = \frac{2\pi}{\omega}$ 이고, $\omega = \frac{F}{R}$ 이 된다. 결과적으로 식 (8) 은 항상 언더컷(undercut) 상태의 형상오차값이 생성됨을 알 수 있다. 같은 방법으로 가감속 형태에 따른 원호변경의 형상오차값은 지수형 ΔR_{exp} 는 식 (9) 로 나타낼 수 있고 직선형 ΔR_{lin} 은 식 (10) 으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{exp}} &= \Delta R_1 + \Delta R_2 \\ &= \frac{1}{2R} \times \frac{V^2}{K_p^2} + \frac{1}{2R} \times T_1^2 \times V^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{lin}} &= \Delta R_1 + \Delta R_2 \\ &= \frac{1}{2R} \times \frac{V^2}{K_p^2} + \frac{1}{2AR} \times T_1^2 \times V^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, R 은 반경 (mm), V 는 이송속도 (mm/sec), K_p 는 위치게인(Hz) 이고 T_1 은 시정수 (sec) 를 나타낸다.

3. 직교배열법을 이용한 실험적인 방법론

3.1 직교배열표에 의한 실험계획⁽⁶⁾

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 값을 특성치(characteristic value)라 하며, 이 특성치에 영향을 주는 원인 중에서 실험에 취급된 원인을 인자(factor)라고 한다. 실험을 하기위한 인자의 실험조건을 인자의 수준(level)이라 하고 인자의 동일수준에서 실험이 되풀이 되는 것을 실험의 반복(replication)이라고 말한다. 제품의 품질을 향상시키거나 불량률을 감소시키려는 실험에서 일반적으로 고려하여야 할 인자의 수는 많다. 인자의 수가 많은 경우에 큰 "그물"을 쳐서 주효과와 기술적인 면에서 있을 것 같은 2 인자 교호작용(상호 영향을 끼치는 작용)을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 2 인자 교호작용 및 고차의 교호작용을 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 작성할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표(orthogonal arrays)이다. 직교배열표가 실험배치에

유효하다고 인정되어 실무에 많이 쓰이기 시작한 것은 비교적 최근의 일로서 Taguchi 의 실험계획법⁽⁷⁾이 큰 역할을 하였다. 그러나 직교배열표 자체가 개발된 것은 오래된 것으로 알려져 있다. 직교배열표를 사용한 실험은 국내에서도 최근에 보급되기 시작하여 연구소나 공장실험 등에 사용되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 직교배열표를 이용하기 위하여 원호반경의 형상오차를 최소화시키는 식 (11)을 목적으로 하며, 이에 따른 인자를 이송속도, 반경, 관성비, 시정수 (time constant) 및 위치게인 (position gain) 으로 하였다.

$$\text{Minimize } \sum \Delta R \quad (11)$$

각각의 수준은 과거 데이터를 통하여 불가능한 수준은 선택하지 않았으며, 교호작용의 효과가 적은 수준을 선택하고 등간격으로 정하였다. 인자와 수준에 대한 사항은 Table 1. 에 나타내었으며 그에 따른 직교배열표는 Table 2. 와 같다.

Table 1. Factors and their levels.

factor \ level	1	2	3	4
Feedrate(A) (mm/min)	1000 (A1)	1500 (A2)	2000 (A3)	2500 (A4)
Radius (B) (mm)	50 (B1)	100 (B2)	150 (B3)	200 (B4)
Inertia ratio (C) (%)	30 (C1)	50 (C2)	70 (C3)	90 (C4)
Time const. (D) (msec)	15 (D1)	25 (D2)	35 (D3)	45 (D4)
Gain (F) (msec)	30000 (F1)	33000 (F2)	36000 (F3)	39000 (F4)

3.2 직교배열표에 의한 실험

실험을 위한 구성은 다음 Fig. 5 와 같이 컴퓨터, NC의 축제어 콘넥터와 PC 간을 연결한 인터페이스 카드 및 공작기계로 간단하다.

4. 원호보간에 의한 오차해석방법

Fig. 6 은 공작기계상에서의 원호보간을 통한 진원도를 평가하는 기하학적인 조건이다. 고정좌표축의 고정좌표 중심이 주축의 원점에 있고 자유좌표축의 명령된 점 $P(X, Y, Z)$ 가 있다. 2 개의 축사이의 중심간 거리를 R 이라고 하면, R 은 식 (12) 와 같이 표현된다.

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (12)$$

Table 2. Table of orthogonal arrays ($L_{16}4^5$).

Number	Column number				
	A	B	C	D	F
1	A1	B1	C1	D1	F1
2	A1	B2	C2	D2	F2
3	A1	B3	C3	D3	F3
4	A1	B4	C4	D4	F4
5	A2	B1	C2	D3	F4
6	A2	B2	C1	D4	F3
7	A2	B3	C4	D1	F2
8	A2	B4	C3	D2	F1
9	A3	B1	C3	D4	F2
10	A3	B2	C4	D3	F1
11	A3	B3	C1	D2	F4
12	A3	B4	C2	D1	F3
13	A4	B1	C4	D2	F3
14	A4	B2	C3	D1	F4
15	A4	B3	C2	D4	F1
16	A4	B4	C1	D3	F2

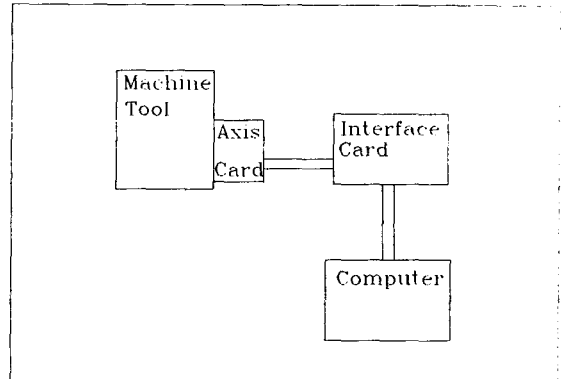


Fig. 5 Schematic diagram for experiments.

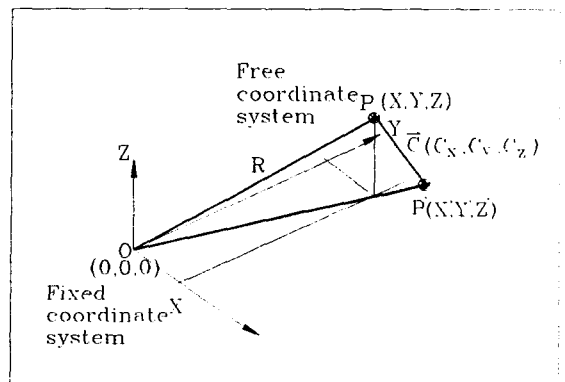


Fig. 6 Geometric errors for circular interpolation

원점 O 에서 $\vec{C}_0 = (0, 0, 0)$ 이고 어떤 점 $P(X, Y, Z)$ 에서 형상오차가 포함된 $P(X', Y', Z')$ 은 다음과 같은 벡터 $\vec{C} =$

$(C_x, C_y, C_z) = (X' - X, Y' - Y, Z' - Z)$ 로 표현된다. 오차 ΔR 은 식 (13) 과 같다⁽⁸⁾.

$$(R + \Delta R)^2 = (X + C_x)^2 + (Y + C_y)^2 + (Z + C_z)^2$$

$$\Delta R = \frac{(XC_x + YC_y + ZC_z)}{R} \quad (13)$$

따라서 $\Delta R = \frac{\overline{OP} \cdot \vec{C}}{|\overline{OP}|}$, 여기서 $\vec{A} \cdot \vec{B}$ 는 벡터 \vec{A} 와 \vec{B} 의 내적이다.

식 (13) 은 $X = R \cos \theta$, $Y = R \sin \theta$ 의 형태를 이용하여 Fig. 7 은 식 (1) 의 서보 loop 지인오차 ΔR_1 을 나타내며, Fig. 8 은 시정수의 불일치에 따른 오차 ΔR_2 의 패턴을 나타낸다.

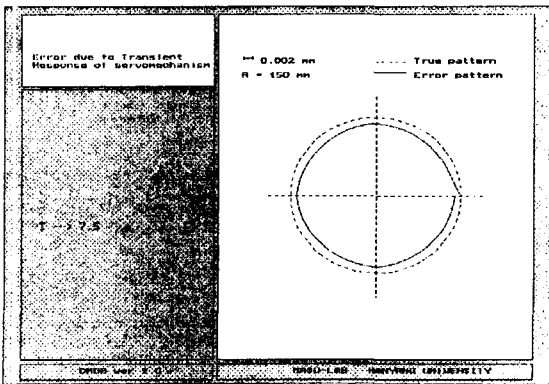


Fig. 7 Errors due to transient response of servomechanism (equals to ΔR_1 's pattern).

Fig. 7 과 같이 측정값 (실선) 의 반경을 구하여 이 때 명령되어진 값 (은선) 과의 차이가 서보지연에 따른 오차값 ΔR_1 이다. 이를 흔히 치수오차 (dimensional error) 라고 한다. 그리고 Fig. 8 은 반시계방향으로 45° 와 225° 인 곳의 측정값이 시정수 불일치에 대한 오차값 ΔR_2 를 나타낸다. 따라서 원호보간 (G02, G03) 을 이용하고 직교배열표에 의한 실험을 통하여 수행된 특성치 (원호반경의 형상오차) 를 평가하는 방법을 Fig. 7 과 8 에 나타내고 있다.

5. 반응표면 분석⁽⁶⁾ 및 고찰

5.1 2 차 다항회귀모형의 적합^(6,9)

반응표면분석 (response surface analysis) 이란 이

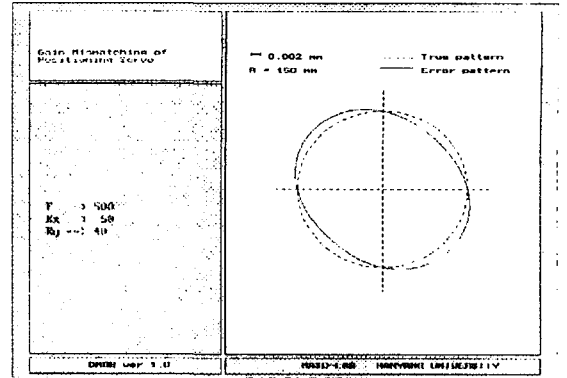


Fig. 8 Gain mismatching of positioning servo (equals to ΔR_2 's pattern).

러개의 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 가 어떤 종속변수 y 에 복합적인 영향을 끼쳐 y 값에 변화가 있을 때, 이들간의 함수관계를 나타내는 반응표면을 통계적인 방법으로 분석하는 것을 말하며 식 (14) 와 같다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (14)$$

여기서 독립변수는 일반적으로 계량인자 (quantitative factor) 이고 종속변수는 이들 인자들에 의하여 민화를 받는 단순계량치이다. 반응표면분석의 주요목적은 y 를 가장 좋게하는 x_i 들의 최적조건을 찾거나, 임의의 x_i 값들에서 y 를 예측하고자 하는 데 있다.

반응표면분석은 독립변수의 수가 2 ~ 4 개 정도이고, 식 (14) 의 함수관계가 2 차 다항회귀모형 (second order polynomial regression model) 인 경우에 주로 사용되며 식 (15) 로 표현된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (15)$$

식 (15) 에서 ϵ 은 오차로 정규분포에 따른다고 가정된다. 독립변수가 4 개 ($k = 4$) 인 경우를 생각하면 식 (15) 는 식 (16) 으로 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4$$

$$+ \beta_{11} x_1^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4$$

$$+ \beta_{22} x_2^2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4$$

$$+ \beta_{33} x_3^2 + \beta_{34} x_3 x_4$$

$$+ \beta_{44} x_4^2 + \epsilon \quad (16)$$

여기서 회귀계수 β_i, β_{ij} 등을 추정하기 위하여 x_1, x_2, x_3 및 x_4 에 대한 실험점 $(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i})$ 에서 y_i 가 n 개로 식 (17) 과 같이 표현된다.

$$(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, y_i), i=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

최소제곱법에 의하여 회귀계수들이 식 (18) 로 추정 된다.

$$\vec{\beta} = \begin{bmatrix} \vec{\beta}_0 \\ \vec{\beta}_1 \\ \vec{\beta}_2 \\ \vec{\beta}_{11} \\ \dots \\ \vec{\beta}_{44} \end{bmatrix} = (X' X)^{-1} X' y \quad (18)$$

여기에서

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} & x_{11}^2 & x_{21}^2 & \dots & x_{11} & x_{21} & x_{n2} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{n2} & x_{12}^2 & x_{22}^2 & \dots & x_{12} & x_{22} & x_{n2} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & \dots & x_{n3} & x_{13}^2 & x_{23}^2 & \dots & x_{13} & x_{23} & x_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{nn} & x_{1n}^2 & x_{2n}^2 & \dots & x_{1n} & x_{2n} & x_{nn} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \text{이다.} \quad \text{식 (18) 에 의하여 얻어지는 추정방}$$

정식은 식 (19) 이다.

$$\hat{y} = \vec{\beta}_0 + \vec{\beta}_1 x_1 + \vec{\beta}_2 x_2 + \vec{\beta}_3 x_3 + \vec{\beta}_4 x_4 + \vec{\beta}_{11} x_1^2 + \vec{\beta}_{12} x_1 x_2 + \vec{\beta}_{13} x_1 x_3 + \vec{\beta}_{14} x_1 x_4 + \vec{\beta}_{22} x_2^2 + \vec{\beta}_{23} x_2 x_3 + \vec{\beta}_{24} x_2 x_4 + \vec{\beta}_{33} x_3^2 + \vec{\beta}_{34} x_3 x_4 + \vec{\beta}_{44} x_4^2 \quad (19)$$

추정방정식에 따라 인자의 수준에 대한 x_1, x_2, x_3 및 x_4 의 최적값을 식 (20) 에 의하여 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} \Big|_{x_2, x_3, x_4} &= \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} \Big|_{x_1, x_3, x_4} = 0 \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} \Big|_{x_1, x_2, x_4} &= \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_4} \Big|_{x_1, x_2, x_3} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

5.2 가감속형태에 따른 실험 및 다항회귀모형

Fig. 2 의 상단부분의 직선형 가감속 형태에서 Table 1. 과 2. 를 통하여 시계방향과 반시계방향 운동 실험을 수행한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

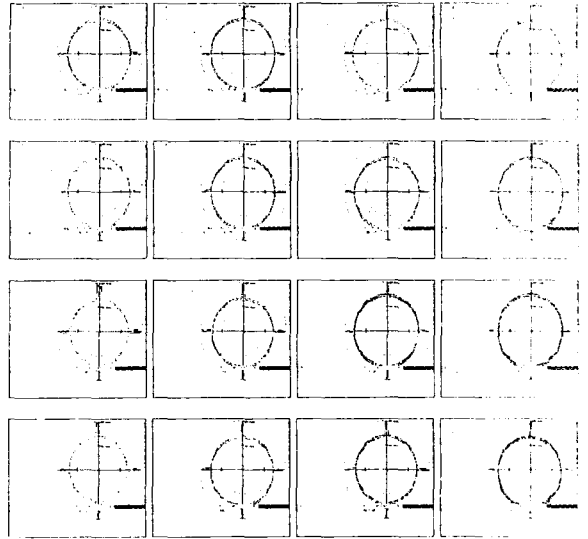


Fig. 9 Experimental data of circular Interpolation according to table. 2 (Linear type).

또한, Fig. 2 의 하단부분의 지수형 가감속 형태에서 Table 1. 과 2. 를 통하여 시계방향과 반시계방향 운동 실험을 수행한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

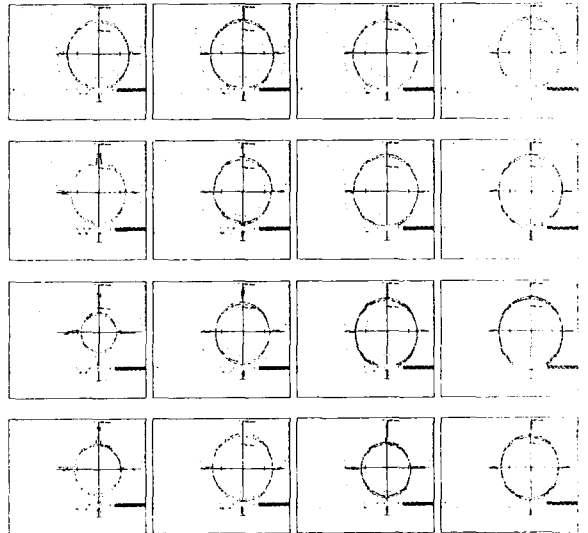


Fig. 10 Experimental data of circular Interpolation according to table. 2 (Exponential type).

Fig. 9 의 데이터를 Fig. 7 과 8 의 오차패턴으로 분리하여 구한 실험치와 식 (9) 와 (10) 을 통하여 계산된 이론치를 실험횟수에 대한 직선형 가감속 형태의 ΔR 값으로 Fig. 11 에 나타내었다. 실험치가 이론치의 약 $\pm 2.3\%$ 이내에서 잘 추종함을 알 수 있다.

Fig. 10 의 데이터를 Fig. 7 과 8 의 오차패턴으로 분리하여 구한 실험치와 식 (9) 와 (10) 을 통하여 계산된 이론치를 실험횟수에 대한 지수형 가감속 형태의 ΔR 값으로 Fig. 12 에 나타내었다. 실험치가 이론치의 $\pm 3.9\%$ 이내에서 잘 추종함을 알 수 있다. 식 (19)를 이용하여 가감속 형태에 따라 추정된 ΔR_1 과 ΔR_2 의 추정계수는 Table 3. 으로 나타내었다.

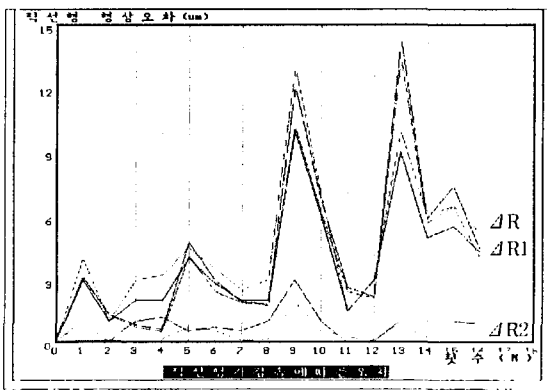


Fig. 11 Comparison data for linear type.

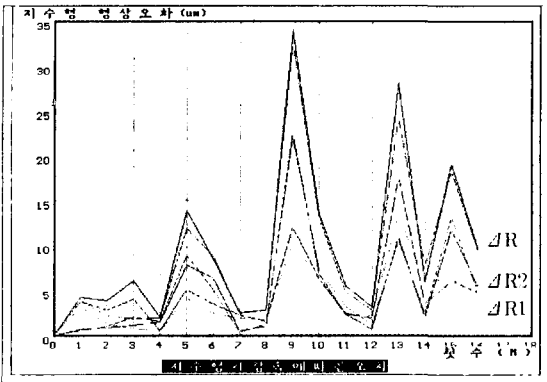


Fig. 12 Comparison data for exponential type.

Table 3 Coefficients of ΔR_1 and ΔR_2

β	0	1	2	3	4	11	12	13	14	22	23	24	33	34	41	
ΔR_1	L	2.98	2.36	-1.8	0.33	-0.2	-3.8	-1.3	0.71	-0.0	-1.9	-3.7	0.20	-0.5	4.52	0.08
	E	34	45	835	11	661	594	170	64	676	595	871	35	966	73	35
ΔR_2	L	16.7	-2.6	-3.5	3.33	0.34	-16.	-2.7	2.78	0.53	1.47	2.32	-0.4	-0.1	-0.2	4.6
	E	91	482	027	61	06	938	165	58	23	95	42	683	115	031	797
ΔR_1	L	7.74	-1.5	-1.3	0.83	-0.8	-8.2	-0.7	-0.1	0.09	0.29	0.38	-0.1	0.02	0.12	-1.9
	E	41	371	686	01	835	432	839	318	20	79	96	753	32	21	902
ΔR_2	L	15.	-1.7	-3.9	2.97	0.86	-15.	-3.2	3.56	-0.0	0.09	-0.7	0.1	1.0	2.18	4.2
	E	961	109	618	44	84	182	80	38	259	38	578	821	971	21	715

6. 결 론

가감속 형태에 따른 운동오차의 영향에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가감속 형태에 따른 형상오차성분을 유도하였다.
2. 실험의 효율성을 위하여 직교배열표를 사용하였다.
3. 형상오차에 대한 실험치와 이론치를 평가하였다.
4. 다항회귀모형을 통하여 형상오차 추정방정식을 제시 하였다.
5. 인자의 수준에 따른 최적파라미터 결정조건을 제시 하였다.

또한, 고속 고정도를 위한 공작기계의 연구에 피드백 제어 (feedback control) 는 물론 피드포워드 제어 (feedforward control) 에 대한 연구가 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

1. MASAYOSHI TOMIZUKA, 1993, "Feedforward digital tracking controllers for motion control applications", Advanced Robotics, VSP and Robotics Society of Japan, Vol. 7, No.6, pp. 575 - 586.
2. H. Ali Pak, G.Q. Li, 1991, "Zero Phase Error Tracking Control for Square Sampled Data System", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 113, pp. 506 - 509.
3. Hiroshi Makino, 1981, "Motion Control of Jointed Arm Robot Utilizing a Microcomputer", 11th ISIR.
4. Y. Koren and C.C. Lo, 1992, "Advanced Controllers for Feed Drives", Annals of the CIRP, Vol. 41/2, pp. 689 - 698.
5. 신동수, 정성중, 1996, "모터의 직선형/지수형/백형 가감속 알고리즘", 대한기계학회 추계학술대회, 개세에 정.
6. 박성원, 1996, 응용실험계획법, 영진문화사, pp. 9 - 23, 93 - 195.
7. Taguchi G., 1987, System of Experimental Design; Vol.1 and Vol.2, UNIPUB/Kraus International Publications, New York.
8. Yoshiaki KAKINO, Yuichi IWAMOTO, Yukitoshi IIIARA, Aketoshi KAMEI and Toru ISE, 1985, "Compensation of 3-Dimensional Coordinate Measuring Machine and Evaluation of Double Ball Bar Test by Error Vector Analysis, JSPE Vol. 51/6, pp. 148 - 154.
9. 김경범, 1990, "자동공정계획을 위한 전삭개수의 지지인 선정", 석사학위논문, 한양대학교.