

< 논 문 >

서보모터의 가감속형태에 따른 운동오차에 관한 연구

신 동 수* · 정 성 종**

(1997년 6월 2일 접수)

A Study on Motion Errors due to Acceleration and Deceleration Types of Servo Motors

Dong-Soo Shin and Sung-Chong Chung

Key Words : Motion Error(운동오차), Acceleration and Deceleration(가감속), Linear Type(직선형), Exponential Type(지수형), Orthogonal Array Method(직교배열법), Second Order Polynomial Regression Model(2차 다항회귀모형화)

Abstract

This paper describes motion errors due to acceleration and deceleration types of servo motors in NC machine tools. Motion errors are composed of two components : one is due to transient response of a servomechanism and the other comes from gain mismatching of positioning servo motors. It deals with circular interpolation to identify motion errors by using Interface card. Also in order to minimize motion errors, this study presents an effective method to optimize parameters which are connected with motion errors. The proposed method is based upon a second order polynomial regression model and it includes an orthogonal array method to make the effective results of experiments. The validity and reliability of the study were verified on a vertical machining center equipped with FANUC 0MC through a series of experiments and analyses.

1. 서 론

오늘날 생산시스템 분야에서 다품종 소량생산에 기초하여 고속·고정도 및 고강성 공작기계의 요구가 날로 심화되며, 또한 무인화 및 자동화에 대한 열의가 높음으로써 점차 제어방식의 고능력화가 요구되고 있다. 따라서 공작기계, 반도체 제조장비, 자동검색기 등과 같은 서보시스템에서는 고속·고정도 위치제어특성과 운동제어특성이 요구된다.^(1,2)

공작기계의 경우 그 성능은 이송계의 제어방식에 좌우되며, 이제까지 많은 연구가 수행되어져 왔다. 서보모터의 제어기술은 하드웨어방식에서 소프트웨어

어방식으로 변화하고 있으며, 이 제어방식은 모터에 부착된 부하에 따라 적절히 대응할 수 있다는 것과 가감속 시정수의 조절범위가 크기 때문에 미세운동제어가 가능하다는 장점을 가지고 있다.⁽³⁾ 미세운동제어를 위하여 서보모터의 제어방식에 따른 공작기계 운동오차의 형태와 보정에 관한 연구가 이루어져 왔으며, 서보모터 자체의 오차와 보정에 대해서도 연구가 수행되어져 왔다.⁽⁴⁻¹⁰⁾

Kakino 등은 DBB(Double Ball Bar) 시스템을 제작하여, 원호보간을 이용한 공작기계 운동오차의 진단 및 보정을 위해 운동오차를 분류하였으며,⁽⁴⁻⁶⁾ 서보시스템 상의 오차요소를 분석한 바 있고,^(7,8) 또한 회전오차 및 Stick 운동에 대한 오차보정과 파라미터의 선정^(9,10)에 관해 연구하였다.

정성종 등은 마이크로프로세서를 이용하여 서보

*회원, 화천기공(주) 기술개발연구소

**회원, 한양대학교 기계공학부

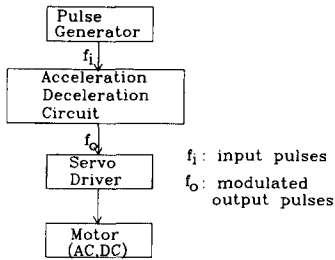


Fig. 1 Position control system (input value : pulse train)

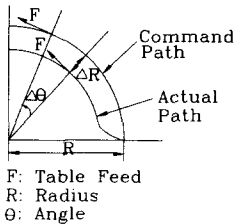


Fig. 2 Tool paths for circular machining

시스템의 위치제어시 이산시간 상태방정식으로 표현되는 Recursive 필터를 이용한 지수형, 직선형 및 벨형 가감속 알고리즘을 구축하였고,⁽¹¹⁾ 그를 이용한 소프트웨어제어방식에 대하여 연구하였다. 또한 모터의 가감속형태가 운동오차에 미치는 영향이 크다는 연구도 한 바 있다.⁽¹²⁾

국내외의 연구현황을 통하여 서보시스템의 가감속형태의 영향이 중요하며, 미세운동제어를 위한 서보시스템의 파라미터 선정은 공작기계의 운동오차값을 최소화하는 경우 중요한 문제로 대두되었다.

따라서 본 논문에서는 파라미터의 선정에 관해 서보모터에서 발생할 수 있는 오차를 Time Domain에서 해석하고 가감속 형태에 따라 모형화 작업을 수행하였다. 서보제어블록의 시정수와 관련된 파라미터들중 작업테이블의 이송속도, 가공반경 및 특히 모터와 테이블과의 관성비율에 대한 관성비 등이 고속·고정도의 위치제어특성과 운동제어특성에서 중요한 역할을 수행하고 있음을 실험적으로 입증하였다. 또한, 실험의 반복성을 배제하고 효율성을 추구하기 위해 직교배열법⁽¹³⁻¹⁵⁾의 실험계획을 적용하고 2차 다항회귀모형화를 이용하여 서보모터의 운동오차값에 대한 오차모델을 추정하였다. 그리고 시행착오적인 방법의 실험없이 회귀모형을 통해 실험인자의 수준에 따른 최적인 파라미터의 결정법을 제시하였다.

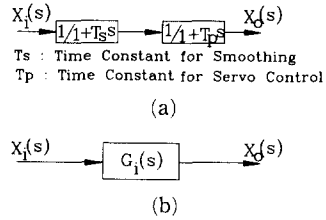


Fig. 3 Block diagram for feed control system

2. 이송계 가감속회로와 서보블록 해석

2.1 가감속회로⁽¹¹⁾

Fig. 1은 위치명령이 펄스열 입력으로 주어지는 일반적인 위치제어 시스템을 보인 것이다. 여기서 위치는 발생된 펄스수로 제어되고, 속도는 발생된 펄스의 주파수로 제어되며, 위치제어는 하드웨어에 의해 실현된다.

2.2 이송계 서보블록 해석

Fig. 2는 지령된 궤적과 실제 궤적사이의 오차를 보여준 것이다. 이때의 R은 입력 반경값이 되며, θ 는 각도가 되고 F는 작업테이블의 이송속도를 나타낸다.

여기서, ΔR 은 원호반경의 운동오차값을 나타내며 이는 서보모터의 루프지연오차와 시정수의 불일치에 따른 오차를 중첩시킨 것이다. Fig. 3은 이송 제어 시스템의 해석을 위한 블록선도이다.

여기서, T_s 는 Smoothing 회로의 시정수이고, T_p 는 서보제어의 시정수이며, $G_1(s)$ 는 전달함수를 나타낸다. Fig. 2에서 원호반경의 운동오차 ΔR 는 결과적으로 식 (1)과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$\Delta R = R \{-1 + [(T_s^2 \omega^2 + 1)(T_p^2 \omega^2 + 1)]^{-\frac{1}{2}}\} \quad (1)$$

식 (1)은 통상 $T_s^2 \omega^2 \ll 1$, $T_p^2 \omega^2 \ll 1$ 이며, Euler 공식을 이용하면 식 (2)와 같이 된다.⁽¹¹⁾

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

여기서, $T = \frac{2\pi R}{F} = \frac{2\pi}{\omega}$ 과 $\omega = \frac{F}{R}$ 를 이용하면, 지수형 ΔR_{exp} 는 식 (3)과 같고 직선형 ΔR_{lin} 은 식 (4)로 표현된다.^(7,11)

$$\begin{aligned} \Delta R_{exp} &= \Delta R_1 + \Delta R_2 \\ &= \frac{1}{2R} \cdot \frac{V^2}{K_p^2} + \frac{1}{2R} \cdot T_1^2 \cdot V^2 \end{aligned} \quad (3)$$

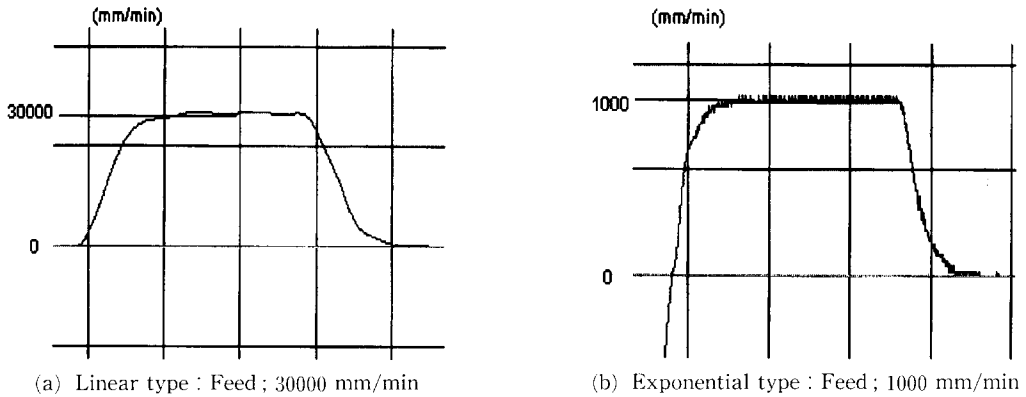


Fig. 4 Experimental results for acceleration and deceleration in servo driver

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)

$$\Delta R_{lin} = \Delta R_1 + \Delta R_2 = \frac{1}{2R} \cdot \frac{V^2}{K_p^2} + \frac{1}{24R} \cdot T_1^2 \cdot V^2 \quad (4)$$

여기서, R 은 가공반경(mm), V 는 테이블의 이송속도(mm/min), K_p 는 서보제어블록의 위치제인(Hz) 그리고 T_1 은 시정수(msec)이다. Fig. 4(a)는 직선형 가감속형태이며, T_1 은 70 msec, K_p 는 30000 Hz 그리고 V 는 30000 mm/min의 급속이송에 대한 선도를 나타내며, (b)는 지수형 가감속 형태이며, T_1 은 40 msec, K_p 는 30000 Hz 그리고 V 는 1000 mm/min의 절삭이송에 대한 선도를 보여주고 있다. 직선형과 지수형 가감속의 구분이 확실히 드러남을 알 수 있다.

3. 실험적 방법론

3.1 직교배열표에 의한 실험계획

본 논문에서는 실험에 취급된 원인을 인자(factor)라고 하며, 인자의 실험조건을 수준(level)으로 구분하여, 서보시스템의 운동오차를 최소화시키는 식(5)를 목적으로 한다. 인자를 테이블의 이송속도,

가공반경, 모터와 테이블의 관성비율인 관성비, 시정수 및 위치제인으로 설정하였다. 위의 인자간의 관계를 규명하고자 하면 4수준 5인자의 실험횟수가 1,073,741,824($4^5 \times 4^4 \times 4^3 \times 4^2 \times 4^1$)이므로 불가능하기 때문에 효율적인 실험방법을 수행하기 위해 직교배열표를 사용하였다.^(13,14)

$$\text{Minimize } \sum \Delta R \quad (5)$$

각각의 수준은 교호작용의 효과가 적은 수준을 선택하고 등간격으로 정하였다.⁽¹³⁾ 인자와 수준에 대한 사항은 Table 1에 나타내었으며, 그에 따른 실험방법인 직교배열표는 Table 2와 같다.

3.2 직교배열표에 의한 실험

FANUC 0MC 제어가 장착된 화천기공(주)의 수직형 머시닝센터를 사용하여 서보시스템의 운동오차데이터를 채취하는 실험을 수행하였다. Fig. 5와 같이 서보제어기 상의 서보명령신호와 이송중 서보위치신호를 샘플링하기 위하여 인터페이스 카드(FANUC Interface Card)를 사용하여 실험을 수행하였다. 종래 Renishaw의 DBB방식은 공작기

Table 2 Table of orthogonal arrays(L₁₆4⁵)

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

계의 스피들들에 장착되기 때문에 작업테이블 상의 공간확보와 설치시간 등이 소요되었으나, 인터페이스 카드방식은 서보유닛에 인터페이스되기 때문에 실가공에 영향이 없고 실험을 위해 설치하는 데 소요되는 시간이 적다.

4. 원호보간에 의한 오차해석방법

Fig. 6은 공작기계 상에서의 원호보간을 통해 진원도를 평가하는 기하학적인 관계를 나타내고 있다.

고정좌표축의 고정좌표 중심이 주축의 원점에 있고, 자유좌표축의 명령된 점 P(X, Y, Z)가 있다. 2개의 축사이의 중심간 거리를 R이라고 하면, R은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \tag{6}$$

원점 O에서 $\vec{O} = (0, 0, 0)$ 이고, 임의의 점 P에서 운동오차가 포함된 P'은 벡터 $\vec{C} = (C_x, C_y, C_z)$

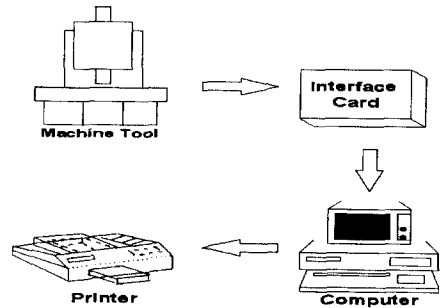


Fig. 5 Schematic diagram for experiments

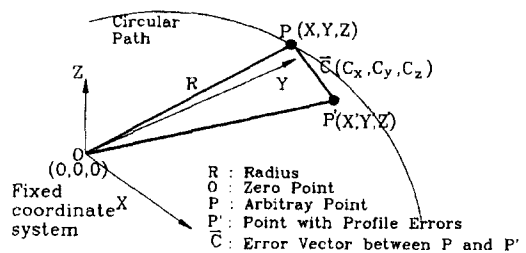


Fig. 6 Geometric errors for circular interpolation

$= (X' - X, Y' - Y, Z' - Z)$ 로 표현된다. 따라서 오차 ΔR 은 식 (7)과 같다. ^(4,10)

$$\begin{aligned} (R + \Delta R)^2 &= (X + C_x)^2 + (Y + C_y)^2 + (Z + C_z)^2 \\ \Delta R &= \frac{(XC_x + YC_y + ZC_z)}{R} \\ &= \frac{\vec{OP} \cdot \vec{C}}{|\vec{OP}|} \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)을 이용하면 Fig. 7과 같은 서보루프지연 오차 ΔR_1 과 Fig. 8의 시정수 불일치에 따른 오차 ΔR_2 의 패턴을 나타낼 수 있다. ⁽¹¹⁾

Fig. 7과 같이 측정값(실선으로 표시된 것)의 데이터를 채취하고 명령되어진 값(은선으로 표시된 것)과의 차이가 서보루프지연에 따른 오차값 ΔR_1 이다. 이를 흔히 치수오차라고도 한다. 그리고 Fig. 8은 반시계방향으로 45°인 곳의 데이터값이 시정수 불일치에 대한 오차값 ΔR_2 를 나타낸다. 따라서 원호보간(가공코드로 G02, G03을 사용)을 이용하고 직교배열표에 의한 실험을 통하여 서보모터의 운동오차를 평가한다.

5. 반응표면분석 및 실험

5.1 2차 다항회귀모형

반응표면분석(response surface analysis)이란 여

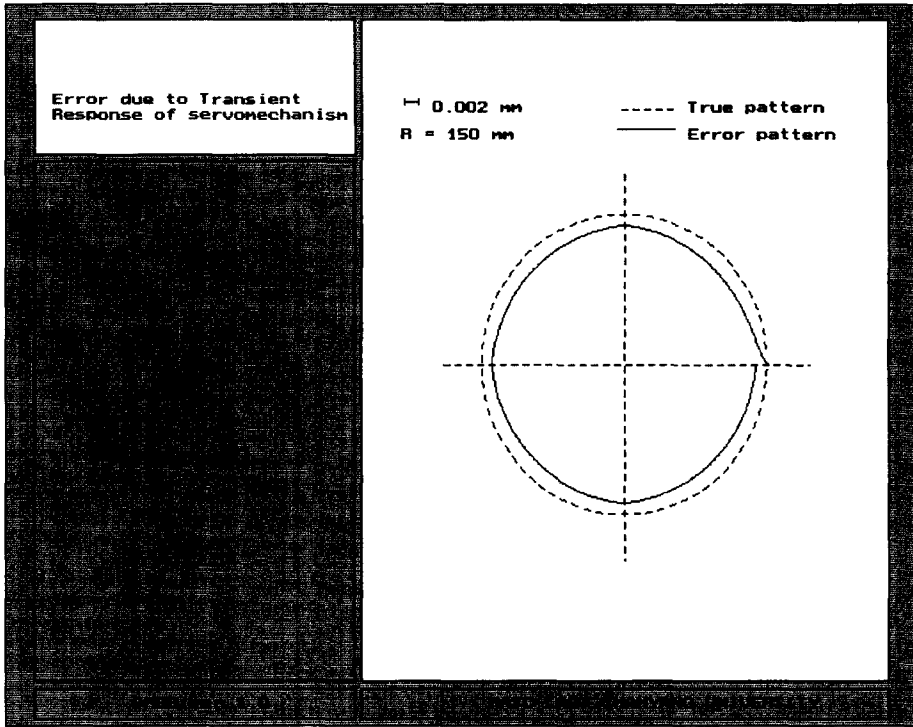


Fig. 7 Errors due to transient response of servomechanism (equals to ΔR_1 's pattern)

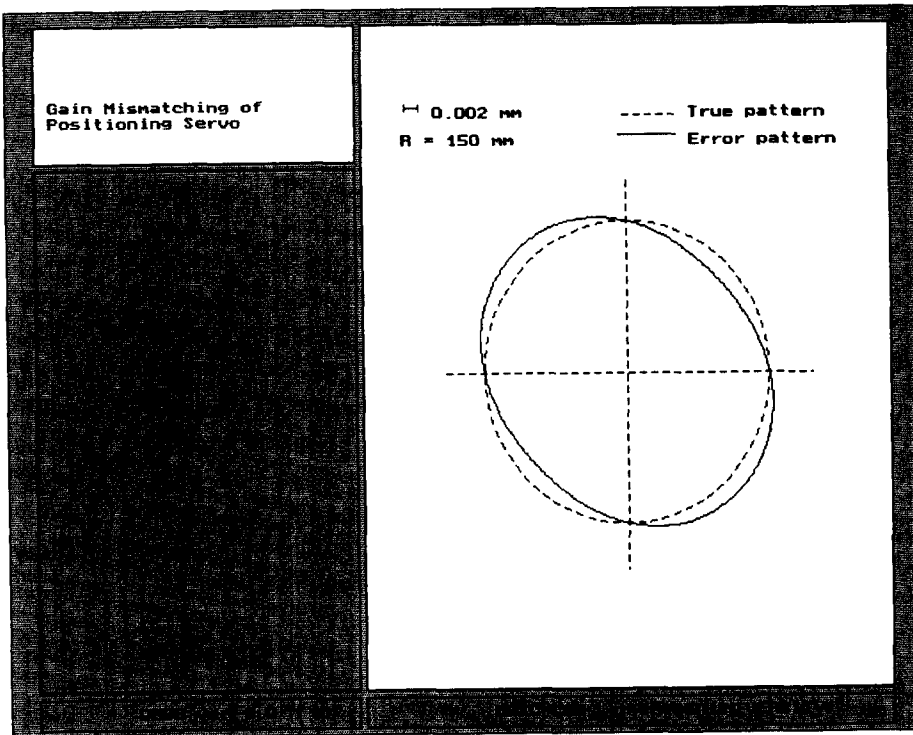
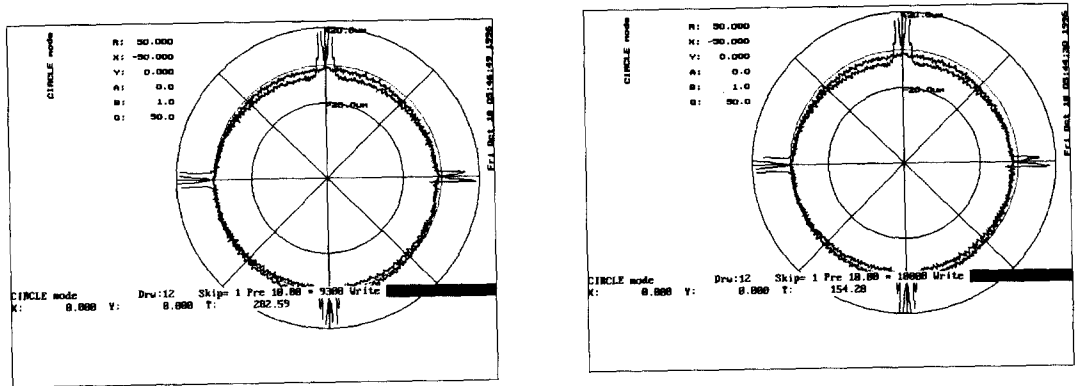


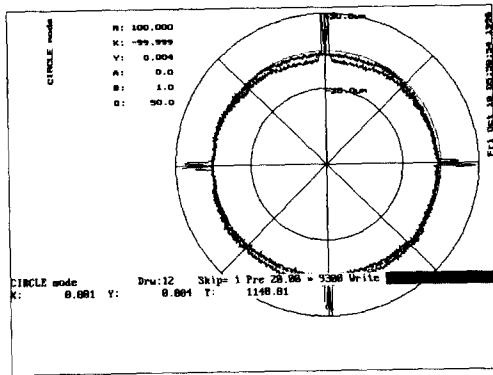
Fig. 8 Gain mismatching of positioning servo (equals to ΔR_2 's pattern)



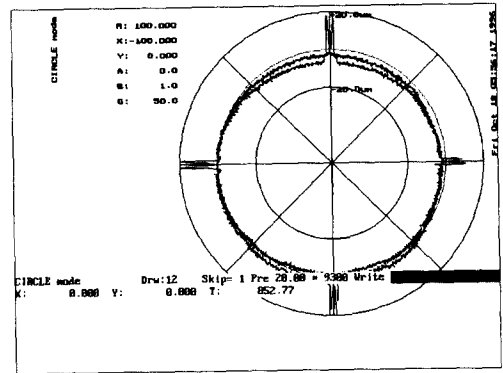
(a) Linear

(b) Exponential

Feedrate : 1000 mm/min, Radius : 50 mm, Inertia ratio : 30%,
Time constant : 15 msec, Gain : 30000 msec



(c) Linear



(d) Exponential

Feedrate : 1000 mm/min, Radius : 100 mm, Inertia ratio : 50%,
Time constant : 25 msec, Gain : 33000 msec

Fig. 9 Experimental results of circular Interpolation using Linear and Exponential type

러개의 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 가 임의의 종속변수 y 에 복합적인 영향을 끼쳐 y 값에 변화가 있을 경우, 이들간의 함수관계를 나타내는 반응표면을 통계적인 방법으로 분석하는 것을 말하며 식 (8)과 같이 함수형태로 표현된다.⁽¹⁴⁾

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (8)$$

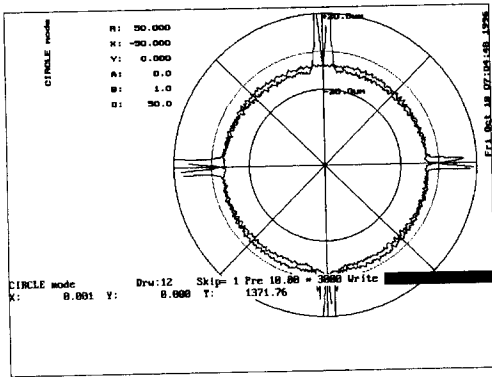
여기서, 독립변수는 일반적으로 계량인자(quantitative factor)이고 종속변수는 이들 인자들에 의하여 변화를 받는 단순계량치이다. 반응표면분석의 주요목적은 y 를 만족하는 x_i 들의 최적조건을 찾거나, 임의의 x_i 값들에서 y 를 예측하고자 하는 데 있다.

반응표면분석은 독립변수의 수가 k 개 이며, 2차

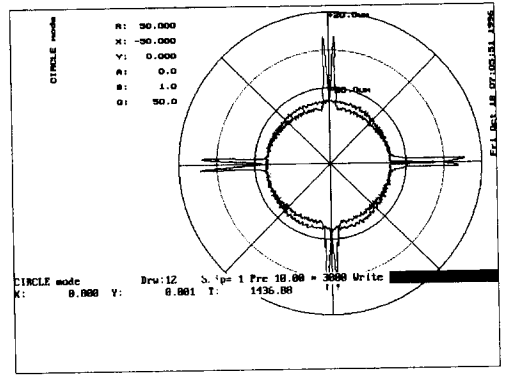
다항회귀모형(second order polynomial regression model)인 경우는

$$y=\beta_0+\sum_{i=1}^k\beta_ix_i+\sum_{i<j}^k\beta_{ij}x_ix_j+\epsilon \quad (9)$$

이 되고, ϵ 은 백색잡음이다. 독립변수가 4개($k=4$)인 경우 회귀계수 β_i, β_{ij} 를 추정하기 위해 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 개 획득되었다면, 회귀계수

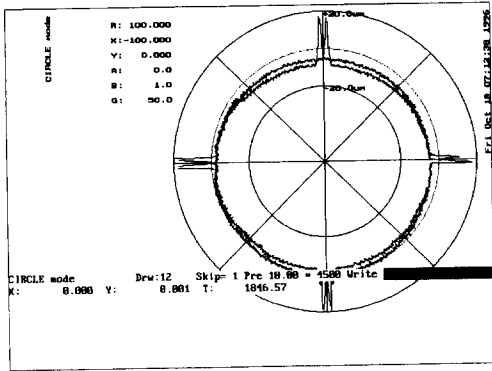


(a) Linear

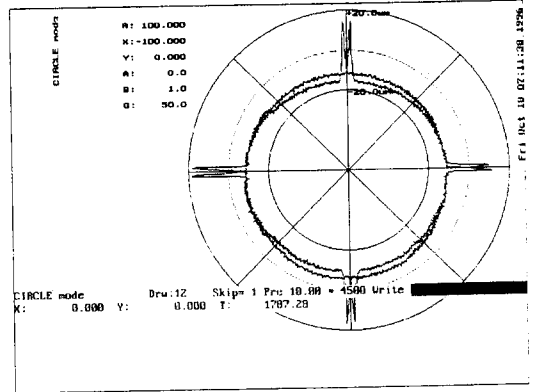


(b) Exponential

Feedrate : 2000 mm/min, Radius : 50 mm, Inertia ratio : 70%,
Time constant : 45 msec, Gain : 33000 msec



(c) Linear



(d) Exponential

Feedrate : 2000 mm/min, Radius : 100 mm, Inertia ratio : 90%,
Time constant : 35 msec, Gain : 30000 msec

Fig. 10 Experimental results of circular Interpolation using Linear and Exponential type

$$\vec{\beta} = \begin{bmatrix} \vec{\beta}_0 \\ \vec{\beta}_1 \\ \vec{\beta}_2 \\ \vec{\beta}_{11} \\ \dots \\ \vec{\beta}_{44} \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (10)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}$$

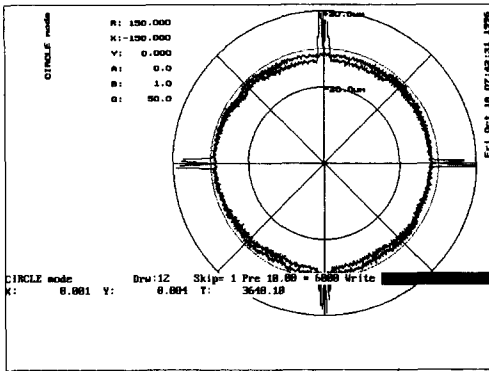
이고, 여기서

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

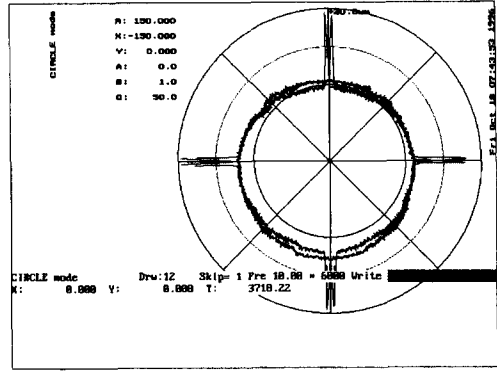
이다.

인자의 수준에 대한 x_1, x_2, x_3 및 x_4 의 최적값은 식 (11)로 표현된다. 여기서, \hat{y} 는 Estimated y 값을 나타낸다.

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} \Big|_{x_2, x_3, x_4} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} \Big|_{x_1, x_3, x_4} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} \Big|_{x_1, x_2, x_4}$$

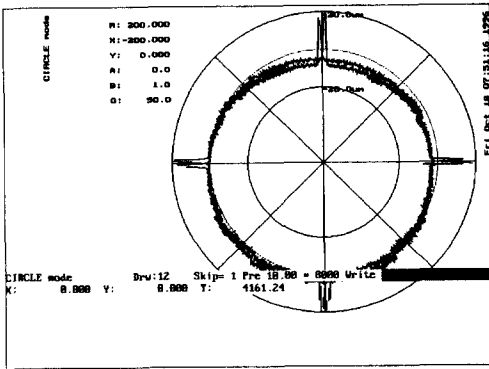


(a) Linear

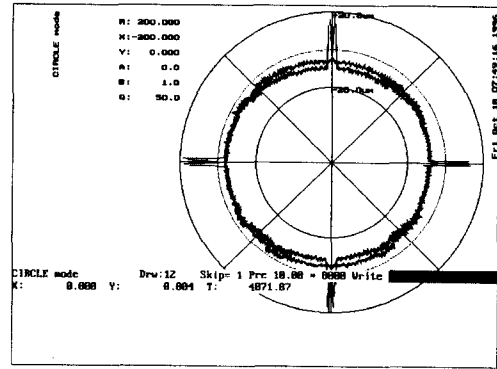


(b) Exponential

Feedrate : 2500 mm/min, Radius : 150 mm, Inertia ratio : 50%,
Time Constant : 45 msec, Gain : 30000 msec



(c) Linear



(d) Exponential

Feedrate : 2500 mm/min, Radius : 200 mm, Inertia ratio : 30%,
Time Constant : 35 msec, Gain : 33000 msec

Fig. 11 Experimental results of circular interpolation using linear and exponential type

$$= \frac{\partial y}{\partial x_4} \Big|_{x_1, x_2, x_3} = 0 \quad (11)$$

5.2 가감속형태에 따른 실험

Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였으며, 직교배열표 Table 2의 1번과 2번 조건으로 각각 Fig. 9(a)와 (c)는 직선형 가감속, (b)와 (d)는 지수형 가감속실험을 시계방향과 반시계방향의 원호보간으로 수행한 것이다. 이송속도 1000 mm/min, 반경은 각각 50과 100 mm, 관성비는 30과 50%, 시정수는 15와 25 msec 그리고 게인값은 30000과 33000 msec의 조건으로 실험을 수행하였다. 비교적 낮은 이송속도에서는 직선형 및 지수형 가감속

형태가 비슷한 오차값을 나타내고 있다.

그러나, 직교배열표 Table 2의 9번과 10번 조건으로 이송속도 2000 mm/min, 반경은 각각 50과 100 mm, 관성비는 70과 90%, 시정수는 45와 35 msec 그리고 게인값은 33000과 30000 msec로 실험을 수행한 Fig. 10은 가감속형태에 따른 뚜렷한 오차의 차이를 보여주고 있다.

또한, 직교배열표 Table 2의 15번과 16번 조건으로 이송속도 2500 mm/min, 반경은 각각 150과 200 mm, 관성비는 50과 30%, 시정수는 45와 35 msec 그리고 게인값은 30000과 33000 msec로 실험을 수행한 Fig. 11은 지수형 가감속형태에서 뚜렷한 운동오차 차이를 보이고 있다.

Table 3 Theoretical Values for linear type

No.	Type	$\Delta R1 (\mu m)$		$\Delta R2 (\mu m)$		$\Delta R (\mu m)$	
		Theoritics	Experiment	Theoritics	Experiment	Theoritics	Experiment
1	L i n e a r	3.09	3.0	0.05	1.0	3.14	4.0
2		1.28	1.00	0.07	0.0	1.35	1.0
3		0.71	2.0	0.09	1.0	0.80	3.0
4		0.46	2.0	0.12	1.2	0.58	3.2
5		4.11	4.00	0.64	0.5	4.75	4.5
6		2.41	2.80	0.53	0.7	2.94	3.5
7		1.91	2.0	0.04	0.5	1.95	2.5
8		1.74	2.00	0.08	1.0	1.82	3.0
9		10.20	10.0	1.88	3.0	12.08	13.0
10		6.17	6.0	0.57	1.0	6.74	7.0
11		2.44	1.5	0.19	0.0	2.63	1.5
12		2.14	3.0	0.05	0.0	2.19	3.0
13		13.40	9.0	0.90	1.0	14.3	10.0
14		5.71	5.0	0.16	1.0	5.87	6.0
15		6.4	5.5	0.98	1.0	7.38	6.5
16		3.99	4.3	0.44	0.9	4.43	5.2

6. 이론과 실험값의 비교검증 및 고찰

Table 2에 따른 조건을 통하여 식 (4)를 이용한 직선형 가감속 이론해석값과 실험값은 Table 3에 나타내었다. 또한, Table 3의 내용을 Fig. 12에 선도를 통하여 나타내었고, 직선형 가감속실험과 이론데이터의 오차값은 $R > \Delta R_1 > \Delta R_2$ 와 같은 경향을 나타내며, 비교적으로 이론데이터가 실험데이터를 잘 추종함을 알 수 있다.

Table 2에 따른 조건을 통하여 식 (3)을 이용한 지수형 가감속 이론해석값과 실험값은 Table 4에 나타내었다. Table 4의 내용을 Fig. 13에 선도를 통하여 나타내었으며, 지수형 가감속실험과 이론데이터의 오차값은 $R > \Delta R_2 > \Delta R_1$ 와 같은 경향을 나타내며, 비교적으로 이론데이터가 실험데이터를 잘 추종함을 알 수 있다.

그러나, 응답성이 느린 지수형 가감속의 운동오차값이 응답성이 빠른 직선형 가감속의 운동오차값

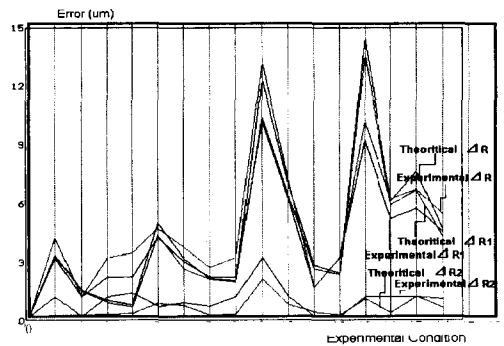


Fig. 12 Error comparisons according to experimental condition (linear type)

에 비하여 2배 정도 큰 상태로 나타남을 알 수 있다. 비교적 추종성이 좋지만, 이론해석 부분의 파라미터에서 테이블과 모터간의 관성비율 등의 항목이 고려되지 않았으므로 이론값과 실험값 사이의 약간의 차이가 보인다. 따라서, 다항회귀모형 식 (9)를 통해 근접한 오차모델식을 나타내고자 하였다.

Table 4 Theoretical values for exponential type

No.	Type	$\Delta R1(\mu m)$		$\Delta R2(\mu m)$		$\Delta R(\mu m)$	
		Theoritics	Experiment	Theoritics	Experiment	Theoritics	Experiment
1	Exponential	3.09	3.7	0.63	0.5	3.72	4.2
2		1.28	2.8	0.87	1.0	2.15	3.8
3		0.71	4.0	1.13	2.0	1.84	6.0
4		0.46	0.5	1.41	1.5	1.87	2.0
5		4.11	5.01	7.66	8.8	11.77	13.81
6		2.41	3.46	6.33	5.04	8.74	8.5
7		1.91	2.2	0.47	0.3	2.38	2.5
8		1.74	1.5	0.98	1.3	2.72	2.8
9		10.20	12.0	22.5	22.0	32.70	34.0
10		6.17	6.3	6.81	7.2	12.98	13.5
11		2.44	2.3	2.32	3.2	4.76	5.5
12		2.14	1.9	0.63	1.2	2.77	3.1
13		13.40	17.5	10.85	10.5	24.25	28.0
14		5.71	3.5	1.95	2.4	7.66	5.9
15		6.4	6.0	11.72	13.0	18.15	19.0
16		3.99	4.8	5.32	4.7	9.31	9.5

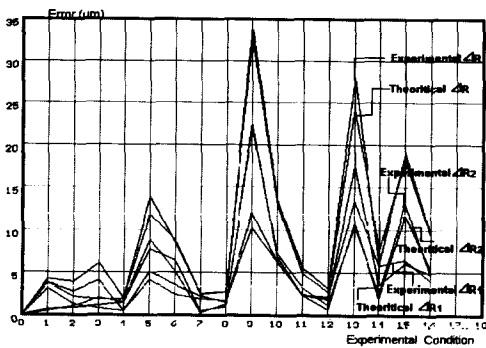


Fig. 13 Error comparisons according to experimental condition (exponential type)

7. 다항회귀모형화를 통한 최적 파라미터 선정

앞절 5.1을 이용하여 서보모터의 직선형 및 지수형 가감속형태에 따라 추정된 이론해석값과 실험해석값 ΔR 의 회귀계수는 Table 5에 나타내었다. 회귀계수를 통해 살펴보면 가감속형태에 따른 이론해

석과 실험해석간의 계수가 다름을 알 수 있으며, 보다 정확한 해석을 위해 실험해석의 회귀모형을 통해 최적인 파라미터를 선정하는 방법을 취하였다.

기존 시행착오의 실험방법을 수행하지 않고 최적인 파라미터를 다항회귀모형화를 통해 선정한 후에 기존의 실험데이터와 최적선정된 실험데이터를 Fig. 14(a), (b)에 나타내었다. Fig. 14(a)는 $\pm 50 \mu m$ 단위로 $\pm 15 \mu m$ 의 오차를 보이지만, Fig. 14(b)는 최적선정된 실험조건을 통해 측정된 값으로 $\pm 10 \mu m$ 단위로 $\pm 4 \mu m$ 의 오차값을 보여주고 있다.

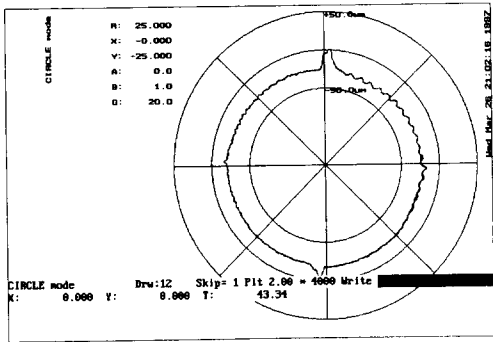
8. 결론

서보모터의 가감속형태에 따른 운동오차에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

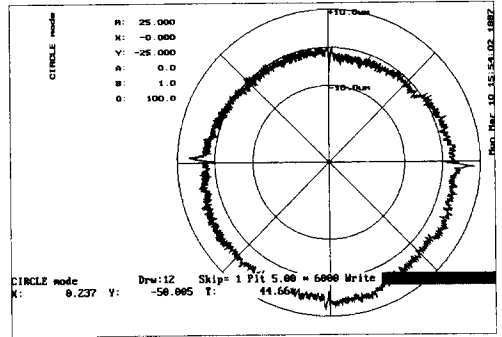
(1) 직선형 및 지수형 가감속형태에 따른 이론적 오차성분을 제시하고, 이때의 실제 속도선도를 통

Table 5 Regression coefficients of ΔR

ΔR		β														
		0	1	2	3	4	11	12	13	14	22	23	24	33	34	44
Theory	Linear	2.9834	2.3645	-1.8834	0.3311	-0.2661	3.8594	-1.3170	0.7164	0.0676	-1.9595	3.7871	0.2035	-0.5966	4.5273	0.0835
	Exponential	16.791	-2.648	3.5027	3.3361	0.3406	-16.938	-2.7165	2.7858	0.5323	1.4795	2.3242	0.4683	-0.1115	-0.2031	4.6797
Experiment	Linear	7.7441	-1.537	-1.3686	0.8301	0.8835	8.2432	0.7839	0.1318	0.0920	0.2979	0.3896	-0.1753	0.0232	0.1221	-1.9902
	Exponential	15.951	-1.711	-3.9618	2.9744	0.8684	-15.182	3.280	3.5638	0.0259	0.0938	0.7578	0.1821	-1.0974	2.4824	-4.2715



(a) Conventional



(b) Proposed

Feedrate : 2500 mm/min, Radius : 25 mm, Inertia ratio : 60%

Fig. 14 Comparisons between conventional conditions and proposed conditions

해 확실하게 형태가 구분됨을 알 수 있었다.

(2) 실험인자의 수가 많아짐에 따라 규명하고자 하는 실험 실행횟수는 커진다. 실험의 효율성과 반복성의 배제를 위해 직교배열표를 사용하였으며, 이에 따른 인자의 수준을 효과적으로 등간격형태를 취해 실험을 수행하였다.

(3) 지수형 가감속형태보다는 직선형 가감속형태가 응답성이 빠르고, 지수형 가감속 운동오차값이 직선형 가감속 운동오차값의 약 2배 정도이며, 직선형에 따른 오차는 $R > \Delta R_1 > \Delta R_2$ 의 경향을 가지며, 지수형에 따른 오차는 $R > \Delta R_2 > \Delta R_1$ 의 경향을 나타낸다.

(4) 운동오차에 대한 실험과 이론값을 비교평가함으로써 비교적 잘 추종됨을 알 수 있었지만, 동적요소인 이송계의 볼스크류와 너트 사이의 마찰로 인해 나타나는 성분 등의 고려되지 않은 파라미터로 인해 이론해석 모형화와 실험해석 모형화 사이의 차이가 있음을 알 수 있었다.

(5) 종래는 시행착오적인 방법을 통해 열악한 환경에서 파라미터를 선정하였으나, 실험적 회귀모형화를 통해 최적파라미터의 조건을 효율적으로 선정하여 기존의 데이터와 비교함으로써 제시된 방법이 효과적임을 입증하였다.

참고문헌

- (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) Pak, H. Ali and Li, G. Q., 1991, "Zero Phase Error Tracking Control for Square Sampled Data System," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 113, pp. 506~509.

- (3) Koren Y. Li, and Lo, C. C., 1992, "Advanced Controllers for Feed Drives," *Annals of the CIRP*, Vol. 41/2, pp. 689~698.
- (4) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, Aketoshi Kamei and Toru Ise, 1986, "Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (1st Report) -The Measurement and Evaluation of Motion Errors by Double Ball Bar Test -," *JSPE*, Vol. 52/7, pp. 85~90.
- (5) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara and Yoshio Nakatsu, 1986, "A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (2nd Report)-Diagnosis of Motion Error Origins by Using Double Ball Bar Test-," *JSPE*, Vol. 52/10, pp. 73~79.
- (6) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, and Yoshio Nakatsu, 1987, "The Measurement of Motion Errors of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1, pp. 377~380.
- (7) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara and Yoshio Nakatsu, 1987, "A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (3rd Report)-The Influence of Servo Control Components to the Motion Error-," *JSPE*, Vol. 53/8, pp. 80~86.
- (8) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, Yoshio Nakatsu, Mitsuo Yonetani and Takeo Teshima, 1988, "A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (4th Report)-Compensating for Decreasing Error of the Circle Radius during Circular Interpolation Motion-," *JSPE*, Vol. 54/6, pp. 105~110.
- (9) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, Yoshio Nakatsu and Akio Shinohara, 1989, "A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools(5th Report)-Diagnosis of Angular Motion Error Origins-," *JSPE*, Vol. 55/3, pp. 153~158.
- (10) Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara, Yoshio Nakatsu and Akio Shinohara, 1990, "A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools(6th Report)-Generating Mechanism of the Stick Motion and its Compensation-," *JSPE*, Vol. 56/4, pp. 139~144.
- (11) 신동수, 정성중, 1996, "모터의 직선형/ 지수형/ 벨형 가감속 알고리즘," 대한기계학회 추계 학술대회논문집 A, pp. 934~941.
- (12) 신동수, 정성중, 1996, "가감속형태에 따른 운동오차의 영향에 대한 연구," 한국정밀공학회 추계 학술대회논문집, pp. 671~677.
- (13) 이종원, 1989, "Taguchi법에 의한 실험계획," 자동차공학회지, 제11권, 제6호, pp. 3~16.
- (14) 박성현, 1996, 응용실험계획법, 영지문화사, pp. 9~23, 93~195.
- (15) Taguchi G., 1987, *System of Experimental Design*; Vol. 1 and Vol. 2, UNIPUB/Kraus International Publications, New York.