

〈論 文〉

통계적 접근법에 의한 원통 래핑 공정의 실험 분석

최민석* · 김정두**

(1993년 3월 27일 접수)

Stochastic Approach to Experimental Analysis of Cylindrical Lapping Process

Min-Seog Choi and Jeong-Du Kim

Key Words: Lapping(래핑), Design of experiment(실험계획법), Orthogonal Array(직교배열), ANOVA(분산분석), Fractional Factorial Design(일부실험법), S/N-ratio(신호대 잡음비), Main effect(주효과), Interaction effect(교호작용 효과)

Abstract

Lapping is a very complicated and random process resulting from the variation of abrasive grains in its sizes and shapes and from the numerous factors having an effect on the process quality. Thus it needs to be analyzed by experimental method rather than by theoretical method to obtain the relative effects of factors quantitatively. In this study, cylindrical lapping experiment designed by Taguchi's L8 orthogonal array was performed and analyzed by Yates' ANOVA table. As a result, effective factors and interaction effects were identified and discussed. Also the optimal factor combination to obtain the largest improvement of surface roughness was selected and confirmatory experiments were performed.

1. 서 론

래핑은 후 가공의 하나로 고품위의 제품을 얻고자 할 때 행하여지는 가공법이다. 가공공정에 영향을 미치는 인자로는 지석의 크기, 래핑압력, 가공속도, 랩제의 공급량 및 랩제의 점도등 다양하며 공정의 복잡성과 난이함으로 인해 전체적인 가공공정에 대한 가공인자들 사이의 관계가 명확히 알려져있지 않은 상태이다. 래핑 공정대한 모델은 일반적으로 Fig.1에 의해 표현된다.⁽¹⁾ 이것은 래핑입자의 두가지 작용모드를 나타낸다. 입자 1은 구름운동을 하고 입자 2는 구름운동은 없고 직선운동만 하는 것으로 가정된다. 전자의 경우 공작물은 칩

(chip)의 발생이 없이 탄성변형과 소성변형을 일으키면서 경화되어서 결국 작은 입자가 파괴되어 떨어져 나간다. 반면에 후자의 경우에는 절삭작용(cutting)에 의해 미세한 칩이 발생한다. 또한 매우 미소한 래핑입자들은 상대적으로 큰 구름입자들에 의해 공작물속에 박히기도 한다. 이와같이 구름입자수와 미끄럼입자수의 비는 래핑의 가공능률에 영향을 미치고 입자의 특성, 랩(lap)과 공작물의 경도, 래핑압력등 많은 변수를 갖기 때문에 이론적

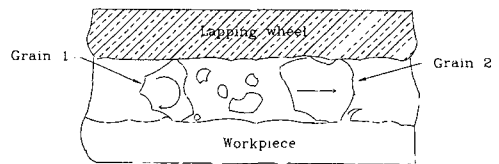


Fig. 1 Model of a lapping process

*한국과학기술원 정밀공학과 대학원

**정희원, 한국과학기술원 정밀공학과

인 예측이 어렵다. 이밖에도 래핑입자 각각의 모양 및 크기가 랜덤하기 때문에 공정을 해석하기 위해서는 실험적인 방법이 요구된다.

공정의 특성을 효율적이고 논리적으로 파악하기 위한 대표적인 방법으로는 실험계획법(design of experiment)이 있으며 실험계획법은 보통 직교배열(orthogonal array)을 이용하여 계획되고 그 결과에 대한 분석은 분산분석표(ANOVA table)를 통해 이루어진다. 직교배열은 제어인자 레벨들의 모든 조합에 대해서 실험을 행하는 요인계획법(factorial design)에 비하여 적은 실험횟수로 관심 있는 정보를 얻어내는 일부실시법(fractional factorial design)의 하나로써 각 제어인자들의 독립성이 유지된다는 의미로 붙여진 명칭이다. 근 60여년 동안 품질관리(quality control)분야의 많은 연구자들이 이 방법에 대한 연구결과를 발표하고 있으며 그중 Yates⁽²⁾는 2^F 요인계획법의 분산분석(analysis of variance)을 위한 제곱합(SS; sum of square)을 계산하는 알고리즘을 제시하였고 Nelson⁽³⁾은 Yates의 알고리즘과 Daniel⁽⁴⁾이 제안한 역 Yates 분석(backward Yates analysis)를 이용하여 분산분석표(ANOVA table) 및 각 제어인자(control factor)들의 평균효과(mean Effect)를 구하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. Taguchi⁽⁵⁾는 산업 현장에서 이용될 수 있는 직교배열들의 목록을 발표하기도 하였으며 신호 대 잡음비(S/N; signal to noise ratio) 및 손실함수(quality-loss function)의 개념을 이용한 제품설계법을 발표하였다. Lenth⁽⁶⁾는 Yates의 알고리즘에 의해 계산된 오차여유(ME; margin of error)와 동시 오차여유(SME; simultaneous margin of error)를 이용하여 제어인자들의 유효성을 판정하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 Taguchi의 신호 대 잡음비와

Yates의 알고리즘 및 Lenth의 알고리즘을 이용하여 원통 래핑공정의 제어인자들의 효과를 분석하였다. 즉 고능률 원통 래핑가공, 특히 고능률 표면조도 향상을 이루기 위한 래핑가공의 제어인자들의 효과를 Taguchi의 직교배열로 디자인된 실험을 행하고 그 결과를 Yates의 알고리즘에 의한 분산분석 및 Lenth의 방법을 통해 정성적으로 분석하였다. 연구의 목적은 이러한 통계적 해석에 의해 표면조도의 향상에 대한 제어인자들의 주효과(main effect)와 제어인자들간의 교호작용효과(interaction effect)를 정량적으로 계산하여 중요한 인자와 그렇지 못한 인자를 알아내고 Taguchi의 신호대 잡음비를 최대로 하는 최적의 인자조합(factor combination)을 찾아내어 검증함으로써 원통 래핑공정의 특성을 효율적으로 파악하는 것이다.

2. 실험

2.1 실험 계획

사용된 2-수준제 일부실시법(two-level fractional factorial design)은 효율적인 실험계획으로 중요하지 않은 인자를 가려냄으로써 더 자세한 조사가 필요한 중요 인자를 찾아내는데 특히 유용하다.⁽⁷⁾ 주된 적용분야는 공정의 특성을 파악하는데 있으며 따라서 정량적인 실험 이전에 정성적인 공정해석을 위해 매우 유용한 도구라 할 수 있다. 이렇게 계획된 실험을 통해 중요하지 않은 제어인자들을 가려내어 공정의 특성화를 위한 실험시간과 노력을 줄임으로써 실험의 효율을 증대시킬 수 있다. 래핑과 같이 많은 변수가 작용하고 가공시간이 길 경우 전체적인 공정을 이론적으로 해석하기 어렵기 때문에 이와같은 효율적인 실험계획법을 사용하는 필요성은 크다고 할 수 있다.

제어인자로는 래핑입자의 크기, 래핑압력, 램제

Table 1 Levels of factors

Symbol	Factor	Lev	
		High(+)	Low(-)
A	Grain size	#500	#100
B	Lapping pressure	3.0 kg/cm ²	1.5 kg/cm ²
C	Number of supply of lapping compound	6	3
D	Lapping speed	100 m/min	50 m/min

의 공급량(공급횟수) 및 래핑속도를 채택하였으며 각 인자의 두 수준(level)에 대해서 실험하였다. Table 1은 실험에서 고려된 제어인자 및 수준을 나타낸다. 반응변수 또는 평가인자(evaluation factor)로는 표면거칠기의 개선능률을 택하였다.

Table 2는 Taguchi 의 L8-직교배열(fold-over type⁽⁷⁾)을 나타낸다. 제어인자의 갯수는 네개이고 생성자(generator)는 한개(D ABC)이므로 이것은 2⁴ 요인계획법에 대해 1/2 의 분율을 갖는 일부실시법에 해당하며 분해도(resolution) IV의 2⁴⁻¹ 일부실시법이다.^(7,8) 따라서 모든 주효과는 상호간 또는 2-인자 교호작용 효과와 교락(confounding or aliasing)됨이 없고 3-인자 교호작용 효과와는 교락을 일으킨다. 즉 A와 BCD, B와 ACD, C와 ABD, D와 ABC는 교락된다. 또한 2-인자 교호작용 효과 끼리는 상호간에 교락을 일으키게 된다. 즉 AB와 CD, AC와 BD, BC와 AD는 서로 교락을 일으킨다. 따라서 2-인자 교호작용의 영향이 중요하게 나타난 경우에는 해석 과정에서 그것과 교락을 일으키는 다른 요인에 대해서도 고려할 필요가 있다. 일반적으로 3-인자 이상의 교호작용은 드물기 때문에⁽⁹⁾ 본 실험을 계획함에 있어서는 모든 주효과와 AB, AC 그리고 BC의 2-인자 교호작용 효과만을 고려하였다. 그러므로 이외의 다른 모든 효과는 무시할 만하다고 가정하여 오차로 풀링(pooling)함으로써 원하는 효과의 예측값을 구하고자 한다. Table 2의 첫번째 열은 실험을 행한 인자들의 조합(TC; treatment combination)을 표준순서(standard order)^(3,9)에 따라 나열된 번호를 나타낸다. 총 조합수는 8 이고 이것은 인자의 갯수가 4인 경우에 분해도 IV를 만족시키는 최소의 수이다.⁽⁷⁾ 실험은 조합의 순서에 관계없이 랜덤하게 행하여 실험순서의 영향이 없도록 하였고 각 조합에 대해 3

회 반복실행하였다. 나머지 열은 7(2³-1)개의 요인(contrast)을 나타낸다. 요인들의 순서는 Taguchi 와 Konishi(5)에 따라 1, 2, 4, 7 행에 주효과를 배치하였으며 나머지 행에 교호작용 효과를 배치하였다. 표에서 +는 고수준(high level), -는 저수준(low level)을 각각 나타낸다. 실험에서는 정량적인 수치를 사용하였으나 그 레벨은 정성적인 의미를 지니고 있는 것으로 본다. 즉 고수준인가 저수준인가의 의미를 나타내는 것으로 본다.

2.2 실험 방법 및 장치

실험에 사용된 가공시편은 지름 50 mm의 SM45 C로 선반주축에 고정하여 회전시키고 제작한 래핑기를 선반에 장착하여 래핑을 행하였다. Fig. 2는 래핑가공 실험장치의 전체적인 배열을 나타낸다. 랩제는 코스모스 콤파운드사의 텅스텐카아바이드(WC)입자와 그리이스를 혼합한 것을 사용하였다. 제어인자로는 래핑입자의 크기(A), 래핑압력(B), 랩제의 공급횟수(C) 및 래핑속도(D)의 네개를 고

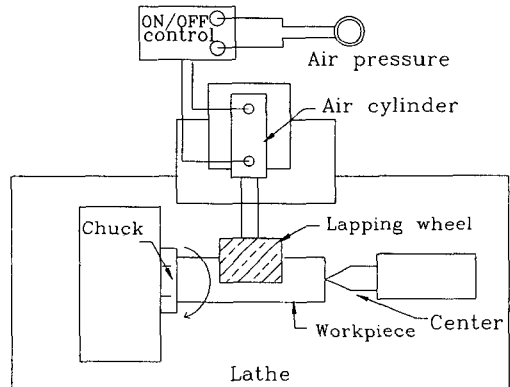


Fig. 2 Experimental set-up

Table 2 Taguchi L8 orthogonal array (fold-over type)

tc	Column No. and Contrast						
	1 A	2 B	3 AB	4 C	5 AC	6 BC	7 D
(1)	-	-	+	-	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	-	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	-	-	+	+	-	-
bc	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+

려하였다. 래핑입자의 크기는 #100 과 #500, 래핑압력은 래핑기의 공압실린더에 공급되는 압력으로 1, 5 kg/cm² 과 3.0 kg/cm² 으로 하였다. 램제의 공급횟수는 3회와 6회이며 래핑속도는 선반의 주축회전수와 공작물의 지름을 고려하여 50 m/min 과 100 m/min으로 하였다. 총 래핑거리는 모든 조합에 대해 20000회전으로 하였다. Table 1에 제어인자와 그에대한 수준이 나타나 있다. 표면 거칠기의 측정에는 미츠토요(Mitutoyo)의 Surf-test-402를 사용하였고 래핑 전, 후의 표면거칠기 값은 주앙부의 30 점(Points)을 측정하여 평균치를 구했다.

2.3 실험 결과

Table 3은 L8-직교배열의 각 조합에 대해 3회 반복실험한 결과를 나타낸다. 여기서 y_i(i=1, 2, 3)는 3회의 실험(n=3)에 대한 표면조도 향상률(%), \bar{y} 는 그들의 평균치, s²은 분산을 나타내고 S/N은 Taguchi의 성능 평가량(performance statistics)을 나타낸다. Taguchi의 신호대 잡음비(식(4), (5), (6))를 사용함으로써 얻을 수 있는 잇점은 평가능력 자체뿐만 아니라 대수형태이고 특히 최대치목표(BIB, bigger is better)의 경우(식(4))에는 측정치의 제곱의 역수를 사용하기 때문에 각 인자들의 분산의 차이의 폭을 줄이게 되어 분산분석 가정중의 하나인 각 인자에 대한 분산의 균일성(등분산)에 좀더 근접시킬 수 있다는 것이다. 본 실험에서는 래핑의 표면조도 향상율을 증가시키는 것이 목표이므로 Taguchi의 신호대 잡음비는 최대치목표의 경우에 대해 계산하였으며 사용된 표현식(10)은 다음과 같다.

$$y_i = \frac{\Delta R_a(\text{표면조도 개선량})}{R_a(\text{래핑전의 표면조도})} \times 100 \quad (1)$$

$$\bar{y} = (y_1 + y_2 + y_3) / 3 \quad (2)$$

$$s^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1) \quad (3)$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

참고로 평가량이 작을수록 좋은 최소치목표(SIB; smaller is better)의 경우와 특정한 목표값이 존재하는 특정치목표(NIB; nominal is better)의 경우에 대한 Taguchi의 신호대 잡음비의 표현식⁽¹⁰⁾은 다음과 같다.

$$SIB : S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \quad (5)$$

$$NIB : S/N = 10 \log \left(\frac{y^2 - s^2 / n}{s^2} \right) \quad (6)$$

3. 결과에 대한 해석 및 고찰

3.1 결과 해석

Table 4는 Table 3의 신호대 잡음비의 Yates 알고리즘⁽⁶⁾에 의한 계산과정을 나타낸다. 이것은 Nelson의 BASIC 프로그램⁽⁹⁾의 계산원리를 보여준 것으로 I 열은 반응치데이터(S/N-ratio)를 위에서부터 차례대로 두개씩 더하여 위의 네개의 값을 만들고 다시 처음부터 두개씩을 빼서 네개의 값을 만든 것이다. 같은 방법으로 I 열의 값을 이용하여 II 열을 만들고 II 열의 값을 용하여 III 열을 만든다. 최종열(이 경우 III)은 본 연구와 같은 일부실시법의 경우 k-p의 값과 같다.⁽⁹⁾ 각 요인들의 제곱합(SS; sum of square)과 평균효과(mean effect)는 식(7) 및 식(8)과 같이 각각 구한다.

$$\text{제곱합} = (\text{III})^2 / 8 \quad (7)$$

$$\text{평균효과} = (\text{III}) / 4, \text{ 단, Average의 경우는 } (\text{III}) / 8 \quad (8)$$

평균효과는 다시 네개의 +에 대한 반응치(S/N비)의 평균에서 네개의 -에 대한 반응치의 평균을 뺀 값과도 같다. 요인 A의 경우에는 Table 2로부터 조합 번호가 2, 4, 6, 8에서 +, 1, 3, 5, 7에서 -이

Table 3 Experimental result

tc	Ra improvement (%)				S/N (dB)
	y1	y2	y3	y (%)	
(1)	22.44	27.75	21.69	23.96	27.4391
a	17.69	17.10	15.01	16.60	24.3361
b	23.29	30.09	25.24	26.21	28.2220
ab	25.41	23.81	25.12	24.78	27.8715
c	16.57	23.98	20.14	20.23	25.8245
ac	16.71	17.53	19.49	17.91	25.0086
bc	37.38	40.86	37.29	38.51	31.6883
abc	31.66	34.79	31.08	32.51	30.2091

므로 A에 대한 평균효과(주효과)는 Table 3으로부터

$$\begin{aligned} & (24.3361 + 27.8715 + 25.0086 + 30.2091) / 4 \\ & - (27.4391 + 28.2220 + 25.8245 + 31.6883) / 4 \\ & = -1.438 \end{aligned}$$

이 되어 Table 4의 값과 같음을 알 수 있다.

Table 5는 이와같이 구한 제곱합과 평균효과를 이용하여 구한 분산분석표이다. 본 실험에서는 여덟개의 각 조합에 대해 하나의 반응치(S/N-ratio)만을 계산하였기 때문에 순수한 오차는 없다. 따라서 전체에 대해 제곱합이 작은 효과를 영으로 대치시킴으로써 인위적인 오차항을 만들어 주었다. 이렇게 함으로써 프로그램 내에서는 Yates의 알고리즘이 역실행되어 각 조합에 대한 효과의 기대치를 구하게된다.^{(9),(10),(11)} Table 4에 나타난 오차항은 5% 풀링법, 즉 요인효과들의 변동(SS)이 총합의 5% 미만인 AB, AC 및 D항을 영으로 대치시킴으로써 생성된 것이다. df(degree of freedom)는 자유도로 각 인자의 관찰된 수준의 갯수에서 1을 뺀 수이다. 교호작용 효과의 자유도는 포함된 인자들의 자유도를 곱한 것이며 오차의 자유도는 5% 풀링법에

의해 풀링된 요인들의 자유도의 합이 된다. 평균제곱합(MS; mean square)은 SS/df로 정의된다. 마지막 열에 있는 F값은 일반적인 분산분석표를 이용한 해석에서 인자의 중요성을 판단하는 기준이 되며 오차평균제곱합(MSE; error mean square)에 대한 요인평균제곱합(MST; treatment mean square)의 비(또는 분산의 비)를 나타낸다.^{(9),(12)}

F표⁽⁹⁾에 의한 임계값은 요인의 자유도가 1 이고 오차의 자유도가 3인 경우에 $\alpha=0.05$ (5% 위험율)에서 10.128, $\alpha=0.1$ (10% 위험율)에서 5.538이다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 95%의 신뢰도($\alpha=0.05$)에서는 B만이 유의로 나타났으며 90%의 신뢰도($\alpha=0.1$)에서는 B 및 BC교호작용과 A가 유의로 나타났다. 나머지 요인들은 별 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 여기서 주목해야 할 것은 C는 90%의 신뢰도에서 자체로는 중요하지 않으나 B와의 교호작용 즉 BC교호작용 효과가 크기 때문에 중요한 제어인자로 다루어져야 한다. Fig. 3은 이에대한 효과를 알기쉽게 보여주고 있다. B와 C가 모두 고수준(high level)일 때 응답변수의 신뢰대 잡음비(S/N 비)는 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 Table 5의 평균효과의 부호로부터

Table 4 Computing procedure of Yates' algorithm

tc	Data	Sum of effects			SS	Mean effect
	(S/N-ratio)	I	II	III		
(1)	27.4391	51.7752	107.8687	220.5592	6083.0	27.575
a	24.3361	56.0935	112.7305	-5.7486	4.131	-1.438
b	28.2220	50.8331	-3.4535	15.3826	29.578	3.846
ab	27.8715	61.8974	-2.2951	2.0892	0.546	0.522
c	25.8245	-3.1030	4.3183	4.8618	2.955	1.216
ac	25.0086	-0.3505	11.0643	1.1584	0.168	0.290
bc	31.6883	-0.8159	2.7525	6.7460	5.689	1.686
abc	30.2091	-1.4792	-0.6633	-3.4158	1.459	-0.854

Table 5 ANOVA table by yates algorithm

tc	SS	%SST	Mean Effect	Measures	df	MS	F
(1)	6083.0		27.575	average			
a	4.131	9.28	-1.438	A	1	4.131	5.706
b	29.578	66.43	3.846	B	1	29.578	40.857
ab	0.546	1.23	0.522	AB	1	0.546	-
c	2.955	6.64	1.216	C	1	2.955	4.081
ac	0.168	0.38	0.290	AC	1	0.168	-
bc	5.689	12.78	1.686	BC	1	5.689	7.858
abc	1.459	3.28	-0.854	D	1	1.459	--
Error	2.172						
Total	44.524	100.0			7		

최대의 신호대 잡음비를 얻기위해 변화시켜야 할 수준의 증감에 대한 정보를 알 수 있다. 즉 A와 D의 평균효과는 음의 부호이기 때문에 저수준에서 큰 신호대 잡음비를 나타내고, B와 C는 고수준에서 큰 값을 나타낸다.

네 개의 제어인자에 대한 표면조도 향상률의 평균 신호대 잡음비 그래프가 Fig. 4에 나타나있다. 이것은 응답치에 대한 주효과를 나타낸 것으로 각각의 인자에 대해서 네개의 고수준에 대한 반응치

(신호대 잡음비)들의 평균과 네개의 저수준에 대한 응답치들의 평균을 그래프로 나타낸 것이다. 이것으로부터 실험상의 최적조합은 A-B+C-D-, 즉 입자크기는 #100, 래핑압력은 3.0 kg/cm², 래핑공급횟수는 6회, 래핑속도는 50 m/min에서 최대의 반응치의 값이 나타남을 알 수 있다. 따라서 신호대 잡음비를 극대화하기 위해서는 제어인자들의 수준을 A는 낮은쪽, B는 높은쪽, C는 높은쪽 그리고 D는 낮은쪽으로 이동시켜야 함을 예측할 수가 있다.

같은 결과를 Lenth의 방법에 의해 분석한 요인들의 효과가 Fig. 5에 나타나 있다. 이것은 Stephenson의 프로그램⁽¹³⁾결과이며 판단의 기준이 되는 오차여유(ME) 및 동시오차여유(SME)에 대한 식(6) (13)을 고려하였다.

3.2 검증 실험

(1) BC 교호작용 효과

전술한 분해도 IV 계획의 특성 때문에 BC 교호작용 효과는 AD 교호작용 효과와 교락을 일으킨다. 따라서 크게 나타난 교호작용 효과가 AD에 대한 것인지 BC에 대한 것인지 구별을 할 수 없기 때문에 이에대한 검증실험을 하였다. 나머지 인자들(A와 D)은 저수준으로 고정하고 B와 C에 대해 앞의 실험에서와 같은 수준에서 네가지 조합에 대

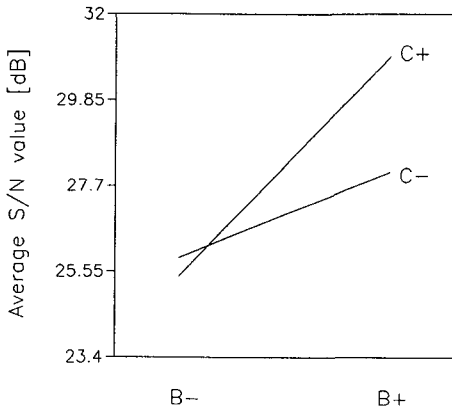


Fig. 3 Plot of BC interaction

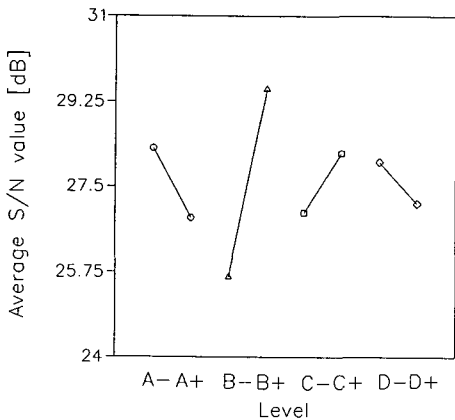
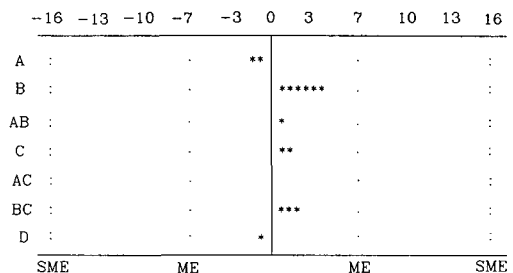


Fig. 4 Response graph for S/N value



ME : margin of error
SME: simultaneous margin of error

Fig. 5 Plot of effects by Lenth's Method

Table 6 Confirmatory experimental result for BC interaction

tc	B	C	Ra improvement(%)				S/N(dB)
			y1	y2	y3	y	
(1)	-	-	20.89	18.90	25.81	21.87	26.5810
b	+	-	22.35	27.71	24.39	24.82	27.7943
c	-	+	18.09	19.16	21.33	19.53	25.7524
bc	+	+	41.66	38.92	43.58	41.39	32.3090

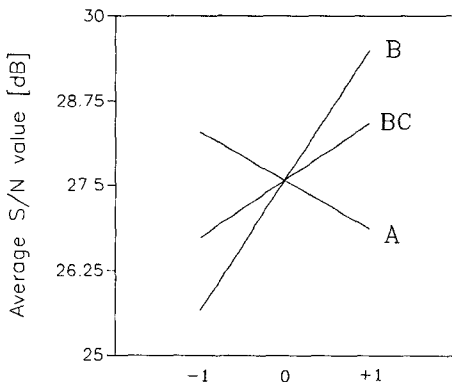
한 실험을 하였다. Table 6은 사용된 2² 조합과 검증실험 결과를 나타낸다. 이로부터 평균효과를 계산하면 B, C 그리고 BC에 대한 평균효과는 각각 3.884, 1.844, 2.672이다. 이것은 Table 4의 값과 큰 차이가 없고 비슷한 경향을 나타내므로 AD 교호작용 효과보다는 BC 교호작용 효과가 큰 영향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

(2) 최적 조합

최적 조합은 A-B+C+D-로 나타났으며 이것은 L8-직교배열에 이미 존재하기 때문에 확인·검증 단계에서는 최적조합 자체의 확인보다는 평가량(S/N 비)을 극대화하기 위해 앞에서 예측된 방향으로 증가 또는 감소된 새로운 레벨에 대해 실험을 하였다. 즉 A(입자의 크기)는 #100 대신 #80, B(래핑압력)는 3.0 kg/cm² 대신 4.0 kg/cm², C(랩제 공급횟수)는 6회 대신 8회, 그리고 D(래핑속도)는 50 m/min 대신 30 m/min으로 하여 실험을 하였다. 3회 실시한 실험결과(표면조도 향상율)(%)는 49.59, 58.02, 47.16 이고 평균은 51.59 이에 대한 신호대 잡음비(S/N 비)는 34.152였다. 이것은 앞의 결과인 31.688보다 약 7.8% 증가(표면조도는 약 34%증가)한 것으로 예측했던 결과임을 알 수 있다.

3.3 반효과(half effect)를 이용한 선형모델

응답변수에 대한 모든 중요 인자들의 관계를 직선적이라 가정하면 2-인자 일부실험시법에서 저수준



A : Grain size B : Lapping pressure
BC : Interaction between pressure and the number of supply of lapping compound

Fig. 6 Relative effect of main contrasts on the change of response

은 -1, 고수준은 +1로 할 때 Fig.6에서와 같이 평균효과(mean effect)는 그 두점 사이의 응답의 변화량이 된다. 따라서 평균효과의 절반인 반효과(half effect)는 직선의 기울기를 나타내고 그것의 총평균(Trial No. 1)은 “개념적인 영점(conceptual zero point)”⁽⁴⁾을 나타내므로 Yates 해석의 결과인 이 값들은 직선 그래프에서 각각의 효과에 대한 계수가 된다. 따라서 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\text{표면조도 향상율(S/N-비)} = 27.575 - 0.719 \times A + 1.923 \times B + 0.843 \times BC$$

위의 식은 실제로 회귀모형과 동일하며 변수들은 Table 4에서 F값에 의해 유의로 판명된 요인만을 사용한 것이다. 여기서 세 개의 변수 즉 A, B, BC는 -1과 +1 두 값만을 가지며 이 값들을 식에 대입하고 다른 변수들에는 영을 대입하면 Fig. 4와 같은 각각의 인자에 대한 주효과의 값이 계산된다. 비 선형성의 존재 여부를 판단하고 모델링하기 위한 방법으로는 3-수준계 요인계획 또는 CCD(Central Composite Design)에 의한 실험등이 있다.

3.4 고 찰

(1) 래핑입자크기의 효과(A)

표면거칠기 개선율은 입자의 크기가 클 수록 증가하였다. 경면생성을 위한 래핑가공은 전단계의 가공에 의한 가공흔적(scratch)제거를 목적으로 한다. 최종 표면조도는 입자크기에 크게 영향을 받으며 입자가 작을수록 표면은 좋은 결과를 나타낸다. 그러나 처음부터 최종표면조도를 목표로 한다면 매우 오랜 시간을 소비하는 비 능률적인 래핑가공이 되기 쉽다. 따라서 비교적 거친 스크래치가 존재하는 래핑초기 단계에서는 가공능률을 최대로 하여 스크래치를 상당부분 제거시키고 난 후에 최종표면조도를 얻기위한 래핑을 실시한다. 마무리 단계에서의 표면조도를 위한 최적조합은 능률중심의 초기래핑가공의 그것과는 반대되는 경향이 있다.

(2) 래핑압력의 효과(B)

래핑압력의 효과는 모든 제어인자들 중에서 가장 크며 압력이 클 수록 표면조도 개선율은 크게 증가하였다. 따라서 이와같은 래핑의 경우 가장 먼저 고려 되어야 할 제어인자이다.

(3) 랩제공급횟수의 영향(C)

Table 5에서 알 수 있듯이 이것은 90 %의 신뢰도(위험율 0.1)로도 유의가 되지 못했다. 따라서 램제의 공급횟수는 표면조도 개선율에 별 영향을 미친다고 할 수 없다. 그러나 B와의 교호작용 효과가 크기 때문에 역시 중요한 인자로 고려되어야 한다.

(4) 래핑 속도의 효과(D)

표면조도 개선율에 대한 래핑 속도의 효과는 적었다. 속도가 느릴때가 빠를때보다는 약간 크게 나타났는데 이것은 총 래핑거리가 20,000 회전으로 일정함에 따라 래핑시간이 길어진 때문으로 간주할 수도 있으나 이에대한 확인실험은 하지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 원통형 SM45C의 거칠은 영역에서의 래핑공정의 표면조도 개선율에 대한 네개의 제어인자 즉 래핑입자의 크기, 래핑압력, 램제 공급횟수 그리고 래핑속도의 효과를 정량적으로 계산함으로써 원통 래핑공정의 특성을 표면조도개선능률의 관점에서 정성적으로 분석하였다. 호울드오버(fold-over)형의 Taguchi L_8 -적교배열로 실험을 계획하고 표면조도 개선율에 대한 Taguchi의 신호대 잡음비(S/N-ratio)에 대해 Yates의 분산분석(ANOVA)을 통해서 각 제어인자들의 영향을 계산하고 최적조합을 구하였다. 그리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 래핑공정의 표면조도 개선능률에 대한 중요인자는 래핑압력 (B)이고 래핑압력과 램제공급횟수간의 교호작용이 존재하였으며 검증실험을 통해 확인되었다.

(2) 표면조도 개선능률의 증대를 위한 최적조건은 A-B+C+D-, 즉 큰 입자, 높은 압력, 다량의 램제공급, 낮은 속도로 나타났고 검증실험을 통해 확인되었다. 검증실험에서 A와 D의 수준은 실험에서 사용된 #100과 50 m/min보다 낮은 #80과 30 m/min을, B와 C는 3.0 kg/cm²와 6회 보다 높은 4.0 kg/cm²와 8회를 사용하여 7.8 %의 신호대 잡음비(S/N 비) 증가를 얻었다.

(3) 실험계획법, 다꾸찌방법을 이용한 통계적인 분석을 통하여 복잡한 원통래핑 공정의 특성을 논리적이고 효율적으로 파악하였으며 공정의 개선을 위한 래핑가공변수들의 최적화를 적은 실험을 통하여 능률적으로 이룰 수 있었다.

참고문헌

- (1) Salje, E. and Paulmann, R., 1988, "Relations Between Abrasive Process," Annals of the CIRP, Vol. 37/2, pp. 641~648.
- (2) Yates, F., 1937, "Design and Analysis of Factorial Experiments," Technical Communication No. 35, Imperial Bureau of Soil Sciences, London.
- (3) Nelson, L. S., 1982, "Analysis of Two-Level Factorial Experiments," Journal of Quality Technology, vol. 14, No. 2, pp. 95~98.
- (4) Daniel, C., 1976, "Applications of Statistics to Industrial Experimentation," John Wiley & Sons, New York.
- (5) Taguchi, G. and Konishi, S., 1987, "Taguchi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs," American Supplier Institute, Dearborn, MI.
- (6) Lenth, R. V., 1989, "Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials," Technometrics, Vol. 31, No. 4, pp. 469~473.
- (7) Bullington, K. E., Hool, J. N. and Maghsoodloo, S., 1990, "A Simple Method for Obtaining Resolution IV Designs for Use with Taguchi's Orthogonal Arrays," Journal of Quality Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 260~264.
- (8) Turiel, T. P., 1988, "A Computer Program to Determine Defining Contrasts and Factor Combinations for Two-Level Fractional Factorial Designs of Resolution III, IV, and V," Journal of Quality Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 267~272.
- (9) Barker, T. B., 1985, "Quality by Experimental Design," Marcel Dekker, New York, New York.
- (10) d'Entremont, K. L., 1986, "Design for Latitude," Columbia., pp. 20~28.
- (11) Crowder, S. V., Jensen, K. L., Stephenson, W. R. and Vardeman, S. B., 1988, "An Interactive Program for the Analysis of Data from Two-Level Factorial Experiments via Probability Plotting," Journal of Quality Technology, Vol.

- 20, No. 2, pp. 140~148.
- (12) Scheaffer, R. L. and McClave, J. T., 1990, "Probability and Statistics for Engineers," PWS-KENT, Boston, 3rd ed., pp. 483~543.
- (13) Stephenson, W. R., 1991, "A Computer Program for the Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials," Journal of Quality Technology, Vol. 23, No. 1, pp. 63~67.