

# 에폭시 절삭시 최적 반응 조건의 선정에 관한 연구

김희남\* 유형욱\*\*

## A study on the selection of optimum response conditions for Epoxy resin cutting

Kim, Hee-Nam · Yoo, Hyung-Wook

### 1.서론

최근 첨단 산업의 발달로 인한 복합재료의 사용이 급증하고 있다. 복합재료중의 섬유강화플라스틱(FRP)은 그 용도가 다양해서 항공우주산업과 기계부품의 요소, 방위산업등 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 섬유강화플라스틱의 특성은 일반 금속재료보다 비강도, 전기 전열성, 높은 감쇠특성등을 가지고 있으나 고분자재료 가공의 대부분을 차지하고 있는 성형가공만으로는 치수의 정도의 향상이나 다품종 소량 생산 체계에서의 복잡한 성형의 부품 제작이 어려워 절삭 가공을 필요로 한다.

FRP는 강화섬유의 종류에 따라서 유리섬유강화플라스틱(GFRP), 탄소섬유강화플라스틱(CFRP), 아라미드강화플라스틱(AFRP)등으로 분류한다. FRP의 절삭에서는 강화섬유 특성의 차이에 따라서 절삭특성에 차이가 있으나 보통 절삭날에 이상 손상이 잘 생기지 않는다. 강과 같은 금속 절삭에 비교하면 절삭열이나 절삭저항이 매우 작다. FRP의 매트릭스로서 에폭시 수지는 열경화성으로 모든 분자 사이에 교차된 연결이나 방조직을 가지고 있다.

현대의 절삭 가공 기술은 지능화한 고성능형 공작기계로 바뀌어져 숙련된 기능을 많이 요구하지는 않는다. 난삭재의 가공에 있어서도 자동

생산 가공 시스템의 안정적인 운영을 위해서는 다량의 절삭 데이터를 데이터 베이스화하여 최적의 절삭 조건을 가공오퍼레이터에게 제공할 수 있어야 한다. 이러한 요구로 볼 때 가공조건을 최적화 한다는 것은 경제적인 측면으로도 매우 중요한 뜻을 가지고 있다. Gilbert<sup>1)</sup>는 single stage manufacturing에 관해 수학적인 모델을 개발하였고, 가공속도를 최대생산율과 최저가공비용에 대한 기준으로 제시하였다.

Wu와 Ermer<sup>2)</sup>는 가공비용, 시간 및 이익율 등에서는 목적함수를 공구수명, 절삭속도, 이송량, 절입깊이 등의 절삭조건으로 정의하고 이 목적함수의 최적화를 찾는 과정으로 요약할 수 있다.

수학적으로 절삭 조건을 결정하기 위한 방법은 여러 각도로 적용할 수 있는데 최적 절삭조건을 해석함에 있어서는 현실적으로 공작기계의 능력이나 피삭재의 기계적 성질, 제품이 요구하는 가공면의 거칠기 및 절삭 공구의 특성 등의 여러 가지 제약을 받게 된다. 그러므로 절삭 조건의 최적화라함은 구속조건하에서의 최적절삭조건을 구한다는 뜻을 포함하고 있다고 할 수 있다.

Wu와 Ermer<sup>3)4)</sup>, Field<sup>5)</sup>등은 미분법을 이용한 해석으로 최적화를 시도하였으며, Iwata<sup>6)</sup>등은

\* 명지대학교 기계공학과  
\*\* 명지대학교 대학원 기계공학과

구속조건들의 확률적성질을 고려한 Chance-constrained programming을 적용시켰다.

따라서 본 연구에서는 복합재료의 매트릭스인 에폭시 수지를 절삭가공시 표면거칠기와 절삭서향에 미치는 절삭 조건의 최적반응을 통계적 최적기법인 반응표면분석을 이용해 절삭조건을 최적화 하였다.

## 2. 최적반응표면분석이란

반응 표면 분석(response surface analysis)은 여러 개의 설명 변수  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응 변수  $\eta$ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응 표면에 대한 통계적인 분석 방법을 말한다. 여기서 설명 변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고, 반응변수는 설명 변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 말한다.

### 2.1 반응표면 모형의 설정

독립변수  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k$ 와 종속변수  $\eta$ 간의 미지의 함수를  $f$ 로 나타내면

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k)$$

가 된다. 실제로 이와 같은 반응 함수(response function)는 알려져 있는 경우가 거의 없으며, 부분적으로 알려져 있다하더라도 실용성이 매우 적은 정도로 복잡한 함수의 형태를 취하는 경우가 대부분이다.

일반적으로 반응함수로서 가정되는 간편하고 실용적인 모형은  $k$ 개의 독립변수에 대한 중회귀 모형(multiple regression model)이다. 이 가정은 독립된 변수들의 모든 값에서 만족할 필요는 없으며, 단지 실험자가 흥미를 가지고 있는 독립변수들의 모든 값에서 만족할 필요는 없으며, 단지 실험자가 흥미를 가지고 있는 독립변수들의 어떤 영역(region)에서만 만족하면 된다.

독립변수  $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k$ 를

$$x_i = \frac{\xi_1 - \xi_{0i}}{c_i}$$

이와같이 선형변환을 시켜서 새로운 독립변수  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 를 정의하고 중심,

$$x' = (x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$$

이 실험자가 생각하는 흥미영역의 한가운데 존재한다고 가정하자.

$x_i$ 에 관한 윗 식에서  $\xi_{0i}$ 는 보통  $\xi_i$ 의 측정된 값들의 평균치로 취하고,  $c_i$ 는  $x_i$ 의 값을 간단하게 해주기 위한 상수이다. 대체로  $x_i$ 의 값이 -1에서 +1사이에 위치하도록 잡아준다.

그러면 새로이 정의된 독립변수에 의한 1차 회귀모형은

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

로 표현된다. 이와 같은 1차모형은 실험자가 좁은 범위의 영역에서 종속변수  $\eta$ 가  $x_i$ 들의 선형모형으로 근사하게 표현 될 수 있다고 믿을 때에 사용될 수 있다.

만약,  $x_i$ 들의 흥미영역에서  $\eta$ 와

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 간에 어떤 함수 관계

$$\eta = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$$

가 있고 함수  $g$ 의 반응 표면이 곡면으로 표현될 것이라고 믿어진다면, 2차 회귀모형을 적합시키는 것이 바람직하고 그 표면은

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon,$$

$\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 이고 서로독립으로 가정하며,

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \\ &= \hat{\beta}_0 + x' b + x' B x \end{aligned}$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_{11} & \frac{\hat{\beta}_{12}}{2} & \dots & \frac{\hat{\beta}_{1k}}{2} \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \frac{\hat{\beta}_{2k}}{2} \\ & & \ddots & \\ & & & \hat{\beta}_{kk} \end{pmatrix}$$

$\hat{y}$ 을 최대 또는 최소화시키는  $x$ 값을 구하기

위해  $\hat{y}$ 를  $x$ 로 미분하면  $\frac{d\hat{y}}{dx} = b + 2Bx$

입의의 점  $x_0$ 를 대입하면  $x_0 = -B^{-1} \frac{b}{2}$  이 되고 입의의 점  $x_0$ 를 정상점(stationary point)라 한다. 정상점은 행렬 B의 고유값에 따라 최대점(행렬 B의 고유값이 음수), 최소점(행렬 B의 고유값이 양수)인 수도 있으며 때에 따라서는 최대와 최소가 동시에 나타나는 안장점(행렬 B의 고유값이 음수와 양수가 섞여있는 형태)일 수도 있다.

이러한 반응 표면의 통계적인 연구 및 분석에서 일반적으로 요구되는 가정은 다음과 같다.

(1) 종속변수  $\eta$ 와 선형 변환된 독립변수  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 간의 함수 관계  $g$ 는 실험자가 정한 흥미영역에서 저차(1차, 2차)의 회귀 모형으로 근사하게 적합 될 수 있다.

(2) 독립변수  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 는 계량변수이며, 실험자가 그 수준을 임의로 정할 수 있고, 거의 무시할 수 있는 실험 오차를 갖는다.

(3) 종속변수  $y$ 도 계량변수이고 실험오차를 가지며 실험자가 그 값을 임의로 정할 수 없는 반응 변수이다.

이러한 기법을 이용해 본 실험에서는 에폭시 수지 절삭시 절삭조건에 따른 절삭저항과 표면 거칠기의 정도를 최소화하는 최적 반응 조건을 선정하려고 한다.

### 3. 실험 장치와 실험 방법

실험은 에폭시 수지를 성형 한 후 절삭 실험을하여 바이트 재종에 따른 절삭 표면의 다양한 현상인 절삭 속도, 이송량, 절입깊이, 절삭력에 따라서 에폭시 수지의 표면 거칠기를 측정 한 후 난삭재인 에폭시수지의 절삭 가공시 최적 가공 조건을 찾으려 하였다.

#### 3.1 피삭재와 바이트 재종

피삭재는 열경화성인 에폭시 수지를 주재료하여 경화재와 촉진재의 비율을 100:85:2으로 혼합한 후 혼합 장치에서 모타를 정역회전하며 충분히 혼합 한 후 성형 틀에 가득 채운 다음 진

동장치에서 진동을 주어 내부의 기공을 상승시킨 후 진공장치에서 액체위의 생성된 기공들을 제거하였다. 경화 조건은 100℃에서 2시간, 120℃에서 2시간, 150℃에서 1시간 동안 경화를 시킨 다음 일정한 시간이 지난 후에 성형틀을 제거한 다음 직경  $\phi 40\text{mm}$  길이 L120mm으로 시편을 제작하여 양센터 작업을 하였다. Table 1은 23℃에서의 에폭시 수지의 특성을 보여주고 있다.

Table 1 Typical properties of cast epoxy resin (at 23℃)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (Mpa)	Tensile module (Gpa)	Thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /℃)	Water absorption %in24hr
1.2 1.3	55 130	2.75 4.10	45 65	0.08 0.15

바이트는 대한중석에서 생산한 초경재종인 K10, P20 과 코팅재종인 KT150을 사용하였으며 노즈 반경은 0.8mm이며 공구 홀더는 CSDPN 2020K 12를 사용하여 절삭 조건 변화의 따른 절삭 특성을 비교하였다.

#### 3.2 실험장치와 데이터의 처리

실험 장치는 Fig. 1와 같이 구성하였으며 공구동력계에서 측정 한 절삭력은 스트레인 증폭기에서 증폭하여 저역 필터를 통과 시킨 후 다시 2차 증폭을 시켜 A/D Converter를 거친 다음 Turbo-lab 소프트웨어로 데이터를 샘플링을 1kHz로하여 분석을 하였다.

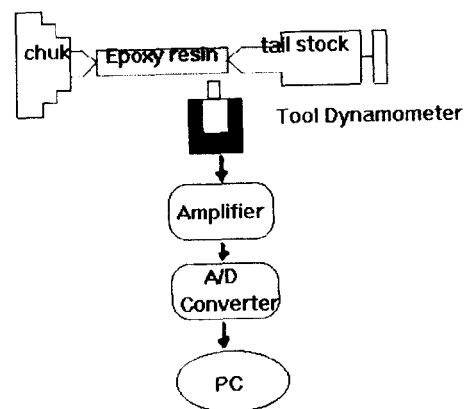


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

표면거칠기는 Mitudoyo사의 Surftester 402를 사용하여 측정하였고, 최적 반응조건을 찾기 위한 반응표면분석을 위해 범용 통계 패키지인 SAS(Statistic Analysis System)의 RSREG procedure<sup>7)</sup>를 사용하였다.

### 3.3 실험 조건

실험 조건은 바이트 재종 K10,P20,KT150으로 공구 홀더 CSDPN 2020K 12를 사용하여 절삭 속도 100, 200, 300m/min와 이송량을 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 mm/rev 그리고 절입을 0.5, 1.0으로 하여 양 센터 작업으로 건식절삭을 행하여 예측수지의 절삭시 절삭 특성을 찾고자 하였으며 절삭 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental condition

Cutting velocity (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Tool
100	0.05	0.5	K10
200	0.10		P20
300	0.15	1.0	KT150
	0.20		

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 절삭 조건에 따른 표면 거칠기의 비교

Fig. 2는 절삭속도 변화에 따른 공구재종별 표면거칠기를 나타낸것으로, K10재종은 절삭속도 변화가 표면 거칠기에 미치는 영향이 작으며 P20와 KT150은 절삭속도와 표면거칠기 값은 비례하며 급속과 비교하여 저속의 영역에서 표면거칠기가 양호한 것은 열경화성의 수지이므로 절삭시 발생하는 절삭열의 영향이 표면거칠기 값을 좌우함을 알 수 있었다.

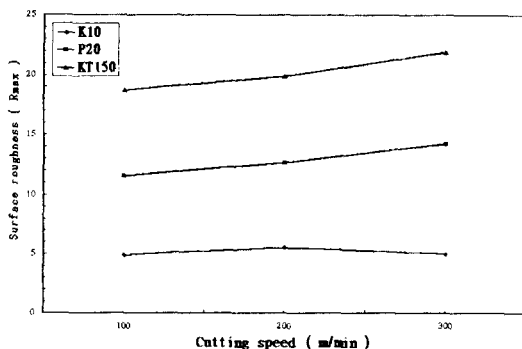


Fig. 2 Relation between Surface roughness vs. Cutting speed

Fig. 3은 이송량의 변화에 따른 공구재종별 표면거칠기를 나타낸 것으로 이송량과 표면 거칠기 값은 K10재종의 경우 비례 증가함을 알 수 있었으며 다른재종으로 절삭가공할 때 보다 가장 표면거칠기가 양호함을 알 수 있었다.

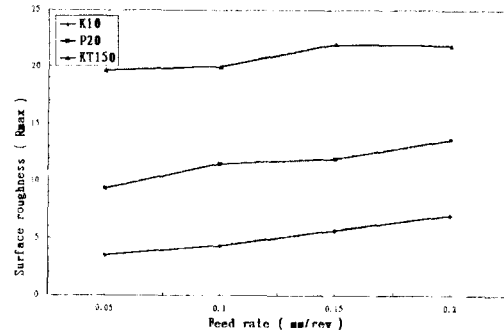


Fig. 3 Relation between Surface roughness vs. Feed rate

Fig. 4는 절입깊이에 따른 공구재종별 표면 거칠기를 나타낸 것으로 K10와 P20은 절입깊이가 표면거칠기에 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었다.

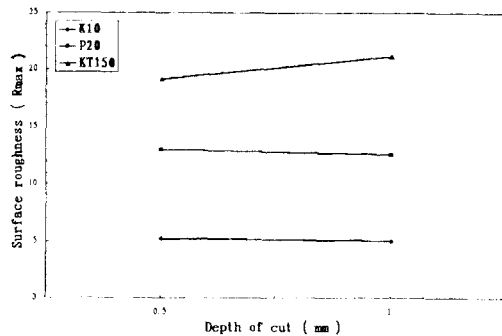


Fig. 4 Relation between Surface roughness vs. Depth of cut

### 4.2 절삭조건에 따른 절삭력의 비교

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 각각 절삭속도와 이송량, 절입깊이에 변화에 따른 주분력의 변화를 나타낸것으로서 절삭속도가 증가함에 따라 KT150와 P20은 점차감소하고 K10재종이 고속의 영역에서 다소 증가하나 급속과 비교해서 그 폭이 크지는 않으며 이송량과 절입깊이에 의한 주분력의 변화량은 비례한다.

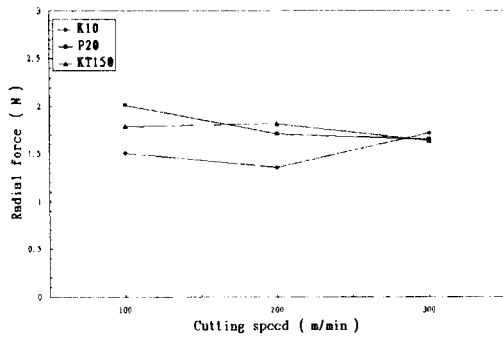


Fig. 5 Relation between Radial force vs. Cutting speed

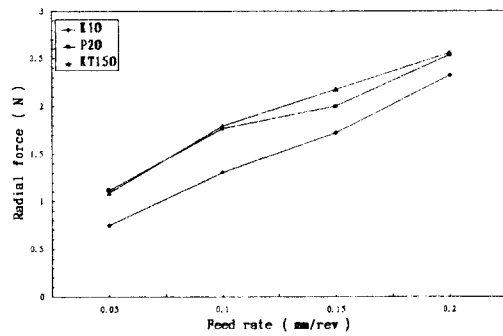


Fig. 6 Relation between Radial force vs. Feed rate

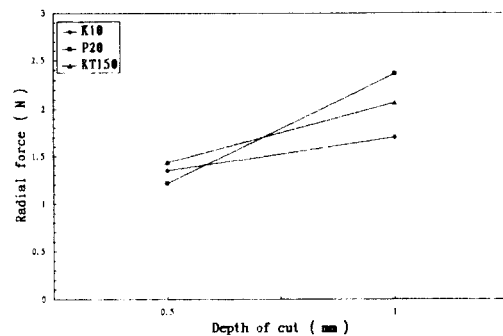


Fig. 7 Relation between Radial force vs. Depth of cut

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각각 절삭속도와 이송량, 절입깊이에 따른 배분력의 변화를 나타낸 것으로서 절삭속도가 증가함에 따라 K10은 증가하는 반면 P20과 KT150은 절삭속도에 변화에 따른 배분력의 변화량이 많지 않으며, K10과 P20은 이송량의 변화에 따른 배분력의 변화 경향이 유사하고 K10은 0.15mm/rev 이후 증가하는 경향이 있다. K10은 절입깊이에 의한 배분력

의 변화가 없으며 P20과 KT150은 절입깊이에 따라 변화한다.

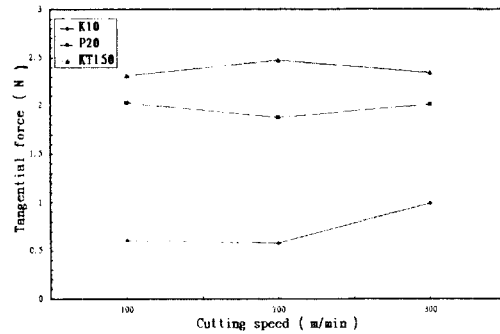


Fig. 8 Relation between Tangential force vs. Cutting speed

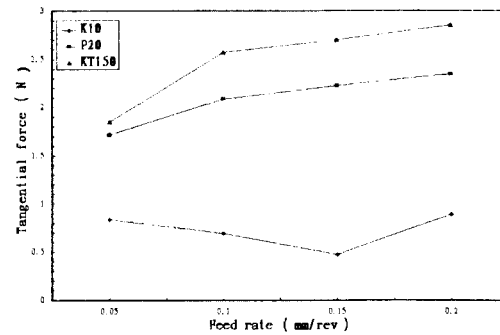


Fig. 9 Relation between Tangential force vs. Feed rate

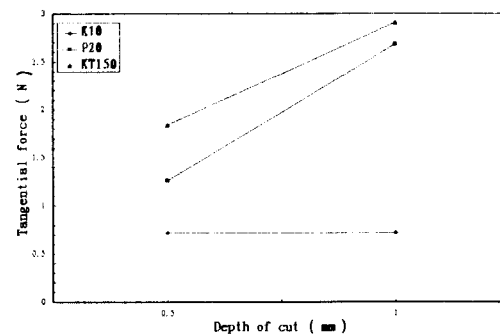


Fig. 10 Relation between Tangential force vs. Depth of cut

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 각각 절삭속도와 이송량, 절입깊이에 따른 이송분력의 차이를 나타낸 것으로서 3종의 공구모두 절삭속도와 이송분력은 반비례하는 경향이 있으며 절입깊이와 이송량의 변화에 따라 이송분력의 증가는 각공구에 따라 비례적으로 나타난다.

에폭시 수지 절삭시 P20와 KT150재종은 K10 재종보다 열전도 계수가 현저히 작아 절삭시 바이트의 끝에 열축적이 일어나 적은 열에도 민감하게 반응을 보이는 에폭시 수지의 변형을 초래하여 절삭가공시 절삭속도 변화에 따른 주분력의 변화가 감소하는 경향이며, 바이트 끝에 축적된 절삭열의 영향을 가장 많이 받는 절삭력은 주축의 회전방향에 접선방향 힘인 주분력이며 상대적으로 배분력과 이송분력에 미치는 영향은 적어 배분력이 크게나타는 경향을 보인다고 생각된다.

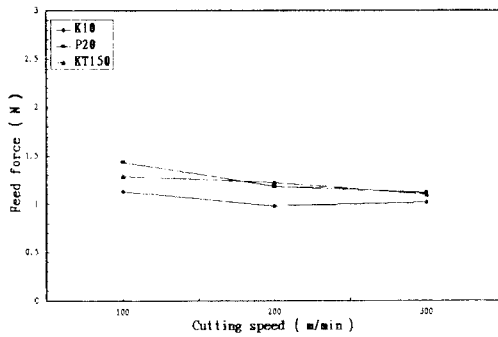


Fig. 11 Relation between Feed force vs. Cutting speed

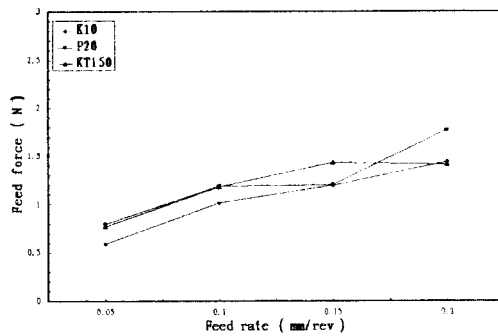


Fig. 12 Relation between Feed force force vs. Feed rate

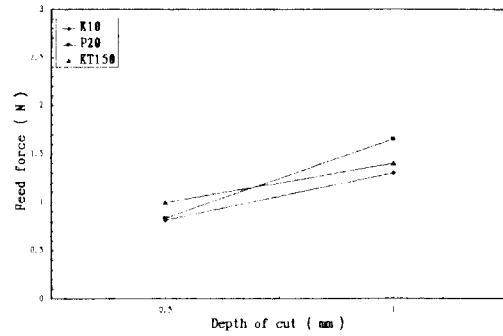


Fig. 13 Relation between Feed force vs. Depth of cut

### 4.3 최적 반응 조건의 선정

K10, KT150, P20공구의 최적 반응추정식에서 행렬B의 형태가 음수와 양수가 혼합되어 있는 안상의 형태를 띄고 있고 자료를 능선(Ridge) 분석을 통해 최소 반응치를 구했다.

각 공구에 대한 최소 반응치는 Table 3과 같다.

Table 3 Response value by cutting condition

Tool	Rmax	res- ponse value	Cutting velocity (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)
	N				
K10	Surface rough- ness	3.72	159.25	0.06	0.82
	Radial force	0.59	197.05	0.05	0.72
	Feed force	0.48	184.89	0.05	0.672
	Tangential force	0.31	158.27	0.112	0.526
KT 150	Surface rough- ness	17.72	105.04	0.148	0.76
	Radial force	1.08	184.33	0.054	0.676
	Feed force	0.75	191.03	0.54	0.676
	Tangential force	1.76	172.62	0.061	0.639
P20	Surface rough- ness	8.5	187.07	0.051	0.772
	Radial force	0.9	206.87	0.083	0.54
	Feed force	0.616	207.285	0.085	0.539
	Tangential force	1.07	206.89	0.113	0.504

최적 반응치로 보아 Fig. 2 ~ Fig. 13에서 나타난 각 절삭조건에서 나타난 개별적인 특성으로만 최적조건을 찾는 것은 바람직하지 못하며 최적 조건을 선정함에 있어서 각 절삭 조건의 새로운 조합이 필요하다고 생각되어지고 그 방법으로 최적 반응 조건을 제안하는 바이다.

최적의 조건이라함은 낮은 절삭 저항과 고온 표면 거칠기를 들 수 있겠으나 예폭시 절삭의 경우 금속절삭시 보다 절삭저항이 무시할 수 있을 정도로 적어 예폭시 수지 절삭시 절삭저항의 최적반응조건 선정에 있어서 표면 거칠기 위주로 선택하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

## 5. 결론

예폭시 수지의 절삭시 표면거칠기와 절삭력은 바이트의 열전도특성에 따라 절삭가공시 절삭열에 의한 영향을 줄일 수 있어 낮은 절삭저항과 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

예폭시 수지 선삭 가공시 절삭 조건에 따른 공구별 최적반응 조건은 다음과 같다.

- 1) K10의 경우 절삭 속도 159.25mm/min 이송량 0.06mm/rev 절입깊이 0.82mm이다.
- 2) KT150의 경우 절삭 속도 105.04mm/rev 이송량 0.148mm/rev 절입깊이 0.76mm이다.
- 3) P20의 경우 절삭 속도 187.07mm/min 이송량 0.051mm/rev 절입깊이 0.772mm이다.

1) W.W.Gilbert, "Economics of Machining", Machining-Theory and Practice, ASM, 1950, pp.465-485.

2) S.M.Wu and D.S.Ermer, "Maximum Profit as Criterion in the Determination of the Optimum Cutting Conditions", Trans. ASME, Series B, Vol.94, 1972, pp.1099-1107.

3) S.M.Wu and D.S.Ermer, "Maximum Profit as Criterion in the Determination of the Optimum Cutting Conditions", Trans. ASME, Series B, Vol.94, 1972, pp.1099-1107.

4) D.S.Ermer and S.M.Wu, "The Effect of Experimental Error on the Determination of Optimum Metal Cutting Condition", Trans. ASME, Series B, Vol.89, 1967, pp.315-322.

5) M.Fied, N.Zlatin, R.Williams and M. Kronenberg, "Computerized Determination and

Kronenberg, "Computerized Determination and Analysis of Cost and Production rates for Machining Operation: part 1 - Turning", Trans. ASME, Series B, Vol.90, 1968, pp.445-466.

6) K.Iwata, Y. Murotsu, T. Iwatsubo and S. Fujii, "A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions", Trans. ASME Series B, Vol.94, 1972, pp.1099-1107.

7) SAS Institute Inc. 1987, SAS/STAT for personal Computers (Version 6 Edition)