

## 실험계획법에 의한 러버실 금형가공을 위한 총형공구의 최적설계

Lihai Li\*(전북대학교 대학원 기계공학과), 임표(전북대학교 대학원 기계공학과),  
이희관(전북대학교 자동차 부품금형 혁신센타), 양균의(전북대학교 기계항공시스템공학부)

### Optimal design of formed tool for die of rubber seals using design of experiments

Lihai Li(Mech. Eng. Dept., CBNU), P. Lim(Mech. Eng. Dept., CBNU), H. K. Lee(CAM-TIC),  
G. E. Yang(Mech. & Aero. Eng. Dept., CBNU)

#### ABSTRACT

The design of experiments are used for optimal design of formed tools to machine automobile bearing rubber seal die, which is classified into the high precision rubber mold. The clearance angle, rake angle and the length cutting edge are considered as the factors. The cutting force is selected to be a characteristic value and compared with the mean tool wear and life by repeated experiments. The design of the experiment is based on the repeated one-way factorial design, which finds the significance of the factors and the best level to predict the tool life by using ANOVA and regression.

Key Words: Formed tool(총형공구), ANOVA(분산분석), One-way factorial design(일원배치법)

#### 1. 서론

러버실(rubber seal)의 품질은 윤활유의 방지와 전동체의 마찰 감소를 최적의 상태로 유지시키는 것으로 결정되며, 고품질의 베어링일수록 러버실 형상이 정교하고 복잡한 특징을 가지고 있다. 이처럼 기하학적으로 복잡한 러버실을 생산하기 위해서는 그 형상을 정확하게 표현하는 금형의 제작이 필수이며, 단납기와 고정밀도를 만족하는 특별한 가공방법이 필요하다<sup>(1)</sup>. 자동차용 베어링 러버실 금형의 제작에서 인서트 타입의 총형공구의 사용은 금형의 품질향상과 생산 cycle단축, 원가 절감 등의 측면에서 경쟁력을 확보할 수 있으며, 공구에 의한 언더컷(under-cut)을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 효율적인 금형가공을 위한 총형공구의 설계는 러버실의 형상과 절삭력을 고려하여 수행 되어야 한다.

본 연구에서는 러버실 금형 가공을 위한 총형 공구의 효율적인 설계를 위하여 주요 설계인자에 대한 특성치의 분석에 실험계획법을 적용하고자 한다. 총형공구의 설계에서 유의한 영향을 가질 것이라고 고려되는 여유각, 경사각 그리고 절인의 길이를 공구

설계인자로 고려하였으며, 총형공구의 수명에 영향이 큰 절삭력을 특성치로 선정하고 반복 실험을 수행하였다. 실험의 설계는 반복이 있는 일원배치법에 의하여 실시되었으며, 분산분석과 회귀분석을 통하여 각 요인에 대한 유의성과 최적 수준을 찾고, 공구 수명을 예측하고자 한다. 이를 총형공구의 설계기준으로 삼아 러버실 금형의 생산가공의 효율성을 도모하고자 한다.

#### 2. 총형공구

총형공구는 얻고자 하는 형상을 목적으로 제작하여 1회의 가공으로 요구하는 형상과 차수를 가공할 수 있는 특수공구를 말하는데, 이 공구를 이용한 가공품의 형상정밀도는 일반 상용 공구로 가공된 것에 비해 뛰어나고, 가공면에 커습(cusp)이 남지 않아 표면거칠기가 양호하다<sup>(2)</sup>. 총형공구의 설계에서 공구수명과 정밀도에 영향을 미치는 인자를 고려하여 절인의 형상을 설계하는 것이 가장 중요하다.

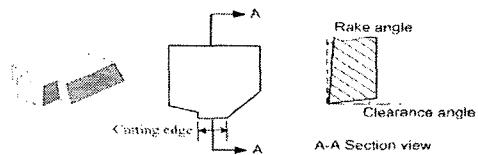


Fig. 1 Design of formed tools

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치 및 조건선정

본 연구에서 사용된 총형공구는 상용 인써트팁 (Insert tip: TaeguTec, SPKN 1203 EDR K10)을 재료로 W-EDM에 의하여 제작되었다. 총형공구의 절삭성을 평가 할 주요인자로는 절인의 길이, 경사각 그리고 여유각을 설정하였다. 9회 반복실험을 수행함으로써 오차항의 자유도를 크게 해주었다. Table 1은 실험을 위한 가공조건의 변동을 보여주고 있다.

Table 1 Experimental conditions for cutting force

Factors	Level				
	1	2	3	4	5
Length	1.8mm	3.8mm	5.8mm	7.8mm	9.8mm
Rake angle	-20°	0°	5°	8°	10°
Clearance angle	5°	8°	11°	15°	20°
Constant factors	spindle: 300RPM feed: 3mm/min depth of cut: 0.01mm				

피삭재는 실제 금형 생산에 사용되는 변형이 적고 경면 연마성이 우수한 초경면성 정밀 플라스틱 금형강(NAK80)이다.

#### 3.2 실험방법

베어링 러버실은 수백㎛의 치수를 갖는 환(環)모양의 기하학적 형상을 가지고 있다. 이와 같은 형상을 고려하여 Fig. 2에서와 같이 러버실 금형은 다수의 동일한 캐비티를 배열한 것으로 이루어져 있으며 하나의 캐비티에서 얻어지는 X축, Y축 방향의 절삭력은 상호 증가와 감소를 반복하며 주기성을 가진 파형으로 난다. 또한 절삭력을 평가하기 위해 1개의 캐비티 내에서 동일 가공거리 만큼의 합력의 평균값을 산출하여 평가하였다.

공구마모는 공구와 피삭재 사이의 상태적인 경도의 함수관계<sup>(3)</sup>를 나타내며 공구수명은 여유면 마모 (flank wear land) 폭을 일정한 값으로 정한 후에 마모 폭을 점검하여 결정된다. 하지만 일정한 여유면 마모폭으로 공구수명을 결정하는 경우는 경사각, 여유각 공구길이에 따라 치수정밀도에 영향을 미치는 정도가 다르게 된다. 이에 경사각, 공구길이, 여유각이 다른 공구로 동일거리를 가공한 후 공구마모 정도를

알아보았다. 여유면 마모폭은 Fig. 3와 같이 여유면 마모 부위에서 여러 부분을 측정한 후 그 평균값 ( $H_1$ )으로 여유면 마모폭을 산출하고  $H_2$ 로 마모를 평가하였다.

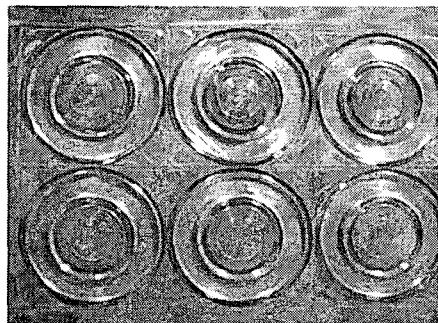


Fig. 2 Rubber seal die

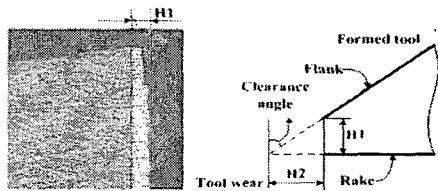


Fig. 3 Tool wear of formed tool

### 4. 실험결과 및 분석

총형공구의 설계인자인 여유각, 경사각 그리고 절인의 길이의 변화에 따른 절삭력 변동을 파악하고자 분산분석을 실시하였고 회귀분석에 의하여 각 인자를 독립변수로 하는 회귀식을 추정하였다.

#### 4.1 절삭력 분석

##### 4.1.1 여유각

여유각은 가공물의 치수정밀도와 공구수명에 영향을 주는 인자라고 보여지며, table 2에서는 여유각에 따른 절삭력의 변동을 보여주고 있다.

Table 2 Cutting force variety of the clearance angles

Force experiment	Clearance angle				
	5°	8°	11°	15°	20°
1	47.347	50.471	43.817	51.376	47.744
2	47.665	50.616	45.597	49.419	45.465
3	49.366	50.066	45.412	52.051	49.432
4	52.381	51.172	45.394	50.257	48.283
5	49.278	48.212	45.143	49.161	48.078
6	50.491	47.840	45.322	50.189	49.085
7	48.970	48.584	44.615	48.888	45.644
8	47.614	49.218	46.072	49.928	48.702
9	47.484	47.777	45.809	51.650	47.780

**Table 3 ANOVA for cutting force of clearance angle**

factor	S	$\Phi$	V	F	F(0.05)
Clearance angle	136.60	4	34.15	20.90*	2.61
Error	65.36	40	1.63		
Total	201.96	44			

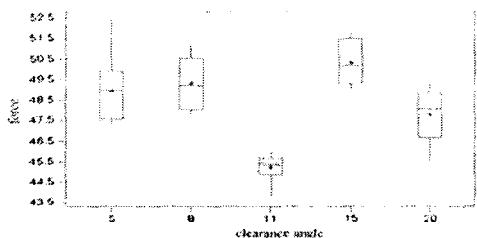
**Fig. 4 Boxplots of force by clearance angle**

Fig. 4은 경사각에 대한 반복실험을 통하여 얻어진 수준별 데이터의 분포를 나타낸 벤다이어그램이다. 3수준인 여유각 11?에서 절삭력이 가장 낮으며 절삭력의 변동이 안정적으로 분포되어 있다는 것을 보여 주고 있다. Table 4는 여유각에 대한 절삭력 변동을 예측하기 위한 다차 선형 회귀 분석 모델의 유의성을 보여주고 있다.

**Table 4 ANOVA for regression model on clearance angle**

Factor	S	$\Phi$	V	F	F(0.05)
regression	35.35	3	11.79	2.90*	2.84
error	166.61	41	4.06		
total	201.96	44			

추정식  $y = -0.01x^3 + 0.37x^2 - 4.33x + 63.01$ 은 유의수준 95%내에서 유의하며 총 변동 중에서 회귀식에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율인 결정계수(coefficient of determination ; R)가 17.5%로 그리 높지 않기 때문에 좋은 회귀식이라고 할 수 없다. 이는 회귀식을 추정하는데 있어서 절삭력 변동을 설명하는데 여유각 만으로는 부족하다는 것을 의미한다.

**Table 5 Tool wear on clearance angle**

Clearance angle	5°	8°	11°	15°	20°
wear	7μm	11μm	17μm	24μm	29μm

Table 5은 여유각에 따른 평균 공구마모를 보여주고 있는데, 절삭력과는 달리 여유각이 작을수록 공구마모가 적어짐을 알 수 있다.

#### 4. 1. 2 경사각

Table 6과 7은 여유각에 따른 절삭력의 변동 및 분산분석을 한 결과를 보여주고 있는데 경사각은 유

의수준 95%내에서 유의하다.

**Table 6 Cutting force variety of rake angle**

Force experiment	Rake angle				
	-20	0	5	8	10
1	74.745	59.600	51.439	43.375	54.971
2	74.134	59.533	51.744	43.526	54.581
3	73.692	59.428	51.881	44.041	54.422
4	73.355	59.686	51.836	44.062	54.073
5	73.726	59.392	51.625	43.884	54.523
6	73.155	59.660	51.640	44.080	54.066
7	72.325	59.641	51.832	44.246	54.144
8	72.711	59.554	52.025	44.079	53.985
9	72.193	59.900	52.005	44.171	54.048

**Table 7 ANOVA for cutting force of rake angle**

Factor	S	$\Phi$	V	F	F(0.05)
Rake angle	1056.47	4	264.12	4090.2*	5.19
Error	0.32	5	0.06		
Total	1056.79	9			

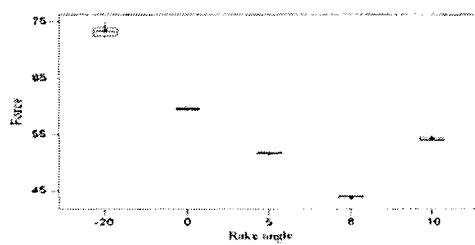
**Fig. 5 Boxplots of force by rake angle**

Fig. 5은 경사각에 대한 수준별 데이터의 분포를 나타낸 벤다이어그램이며, 4수준인 경사각 8에서 절삭력 분포가 가장 낮다는 것을 보여주고 있다.

**Table 8 ANOVA for regression model on rake angle**

Factor	S	$\Phi$	V	F	F(0.05)
regression	3992.12	3	1330.71	172.493*	2.84
error	316.30	41	7.71		
total	4308.42	44			

**Table 9 Tool wear on rake angle**

Rake angle	-20°	0°	5°	8°	10°
wear	10μm	8μm	6μm	2μm	4μm

Table 8는 경사각에 대한 절삭력 변동을 예측하기 위한 다차 선형 회귀 분석 모델의 유의성을 보여주고 있다. 추정한 1, 3차의 회귀식은 모두 유의하지만, 회귀식에 의하여 설명되는 결정계수가 92.7%인 3차 회귀식인  $y = 0.1x^3 + 0.12x^2 - 3.27x + 60.35$ 가 더욱 적절하다.

Table 9은 경사각에 따른 평균 공구마모를 보여주고 있다. 경사각이 크면 칩 배출이 용이하고 칩과 공구사이의 마찰력을 줄일 수 있어 절삭력이 감소한다. 경사각이 점차 증가함에 따라 절삭력은 감소하다가 10°에 도달하였을 때는 절삭력은 예비하여 증가하였다.

#### 4. 1. 3 절인 길이

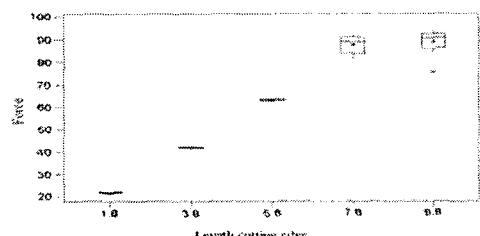
Table 10과 11은 절인의 길이에 따른 절삭력의 변동 및 분산분석을 한 결과를 보여주고 있다.

**Table 10 Cutting force variety of cutting edge length**

Force experiment	Cutting length				
	1.8mm	3.8mm	5.8mm	7.8mm	9.8mm
1	22.052	42.562	64.345	80.182	75.873
2	22.267	42.576	64.150	82.941	83.903
3	22.101	42.032	63.638	85.177	88.507
4	21.769	42.038	62.990	87.302	91.025
5	21.699	41.857	63.393	89.270	92.843
6	21.669	41.694	63.353	90.451	92.827
7	21.787	41.596	62.910	91.020	90.725
8	21.695	41.533	62.639	91.822	91.992
9	21.908	41.869	62.473	92.240	94.568

**Table 11 ANOVA for cutting force on cutting edge length**

Factor	S	Φ	V	F	F(0.05)
length	30678.7	4	7669.7	723.82*	2.61
Error	423.8	40	10.6		
Total	31102.6	44			



**Fig. 6 Boxplots of force by cutting edge length**

절인 길이는 유의수준 95%내에서 유의하다. Fig. 6은 절삭력의 분포를 벤다이어그램으로 나타낸 것이다. 절인 길이가 커짐에 따라 절삭력은 대체적으로 선형적인 증가 추세를 나타났지만 절인 길이가 7.8mm에서 9.8mm로 증가 하였을 때는 불안정한 절삭력 증가추세를 나타냈다. 불안정한 절삭력이 나타나는 이 시기를 절인 길이의 기준으로 삼고 총형공구를 설계 시 기준을 초과하지 않는 기준으로 한다.

Table 12은 절인의 길이를 위한 다차 선형 회귀분석 모델의 유의성을 보여준다. 3차 회귀식인  $y = -0.25x^3 + 3.82x^2 - 6.09x + 22.37$ 가 적절하다.

Table 13는 경사각에 따른 평균 공구마모를 보여주고 있다. 절삭력 길이의 변화에 따라 공구마모는 큰 차이를 보이지 않았지만 9.8mm일 때는 상대적으로 마모가 신속히 발생한 것을 볼 수 있다.

**Table 12 ANOVA for regression model on cutting edge length**

Factor	S	Φ	V	F	F(0.05)
regression	30576.2	3	10192.1	793.95*	2.84
error	526.3	41	12.8		
total	31102.6	44			

**Table 13 Tool wear on cutting edge length**

length	1.8mm	3.8mm	5.8mm	7.8mm	9.8mm
wear	8μm	9μm	9μm	9μm	16μm

## 4. 결론

효율적인 금형가공을 위하여 총형공구의 설계 시 실험계획법을 적용함으로써 경사각과 여유각 그리고 절인의 길이가 절삭력과 공구수명에 대한 영향을 검토하였다.

1) 유의수준 95%내에서 경사각과 여유각 그리고 절인의 길이는 모두 유의하며 총형공구의 설계시 절삭력에 영향을 끼치는 인자들이며, 이중에서 경사각은 주요인자로 고려된다.

2) 경사각과 절인의 길이의 변화에 따라 절삭력과 공구마모 상태는 비교적 큰 차이가 생겼으며 절삭력은 추정된 회귀식을 이용하여 90%결정계수 안에서 예측이 가능하였다.

3) 실험계획법에 의한 최적설계를 통해서 insert type 총형공구를 이용한 러버실 금형가공에서 정밀도, 생산 효율성을 향상 시켰다.

## 참고문헌

- H.C.Kim, H.K.Lee, J.C.Huang, G.E.Yang "Study on Machining Electrode for LED Mold" Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 10, October PP188 -194 2002.
- Sang-Heup Roh, Hi-Koan Lee, Yeun-Sul Kim, Do-Hyung Kim, Gyun-Eui Yang "A Study on Mold Machining for Bearing Rubber Seal by Formed Tool" Journal of the Korean Society of Precision Engineering, vol. 21, No. 2, PP21-26, 2004.
- J. Wang, C.Z. Huang, W.G. Song, "The effect of tool flank wear on the orthogonal cutting process and its practical implications", Materials Processing Technology, 142, pp. 338-346, 2003.