

## 실험계획법에 의한 자동차용 리버실 금형가공을 위한 총형공구의 최적설계

이 여 해<sup>1)</sup> · 임 표<sup>1)</sup> · 이 희 관<sup>2)</sup> · 양 균 의<sup>3)</sup>

전북대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 전북대학교 자동차부품 · 금형 기술혁신센터<sup>2)</sup> · 전북대학교 기계항공시스템공학부<sup>3)</sup>

### Optimum Design of Formed Tool for Die of Bearing Rubber Seal Using Design of Experiments

Lihai Li<sup>1)</sup> · Pyo Lim<sup>1)</sup> · HiKoan Lee<sup>2)</sup> · GyunEui Yang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

<sup>2)</sup>Chonbuk National University Automobile-parts & Mold Technology Innovation Center, Jeonbuk 561-844, Korea

<sup>3)</sup>Division of Mechanical & Aerospace System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 31 August 2006 / Accepted 12 December 2006)

**Abstract :** A bearing is one of core parts in automobile. Rubber seal of the bearing is important to improve performance of bearing, formed by hot-press die of rubber seal for the intricate shape. In this study, formed tools are used to machine die of bearing rubber seal and the machining operation is classified into the several process of high precision. Design of experiments is used to optimize selection of the formed tools for the efficient machining of the hot-press die. The cutting force, tool wear and tool life are determined to characteristics. And, the clearance angle, the rake angle and the length cutting edge are considered as the major factors. Experiments are repeated to use one-way factorial design, and tool life is predicted by regression model.

**Key words :** Rubber seal(리버실), Formed tool(총형공구), Design of experiments(실험계획법), One-way factorial design(일원배치법), Regression model(회귀모델)

### 1. 서 론

베어링은 2만종 이상의 매우 다양한 종류가 있으며, 광범위하게 사용되는 기계부품 중의 하나이다. 자동차 산업분야에서는 변속기, 벨트텐션, 엔진스타터 등에서 핵심적인 역할을 하며, 전동체, 리테이너, 하우징, 실 등의 요소 부품으로 구성되어 있다. 리버실은 윤활유의 누출 방지 및 외부로부터 이물질의 차단과 베어링의 저 마찰력에 의한 운동 전달 기능을 원활하게 수행하는 역할을 하도록 한다.<sup>1)</sup>

리버실의 품질은 전동체의 마찰을 감소시켜 최적의 상태로 유지시키는 것으로 결정되며, 고품질의 베어링일수록 리버실 형상이 정교하고 복잡하다. 하지만 기하학적으로 복잡한 리버실을 생산하기 위해서는 그 형상을 정확하게 표현하는 금형의 제작이 필수이고, 단납기와 고정밀도를 만족하는 특별한 가공방법이 필요하다.<sup>2)</sup>

이에, 자동차용 베어링을 위한 리버실 금형의 제작에서 인서트 타입의 총형공구(formed tool)의 사용은 금형의 품질 향상과 생산 사이클단축, 원가 절감 등의 측면에서 경쟁력을 확보하며, 공구에 의한 언더컷을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다.<sup>3)</sup> 총형

\*Corresponding author, E-mail: geyang@chonbuk.ac.kr

공구는 원하는 형상을 목적으로 제작하여 1회의 가공으로 요구되는 형상과 치수를 가공할 수 있는 특수공구를 말하는데, 이 공구를 이용한 가공품의 형상정밀도는 일반 상용 공구로 가공된 것에 비해 뛰어나고, 가공면에 커슥(cusp)이 남지 않아 표면거칠기가 양호하다.<sup>4)</sup> 공구의 설계는 러버실의 형상과 절삭력을 고려하여 수행되어야 하는데, 총형공구의 형상을 결정하는 많은 설계변수가 존재한다. 하지만, 모든 변수를 고려한 공구설계는 쉽지 않으므로, 러버실의 주요 형상 특징을 탐색하여 공구를 제작하되, 공구의 수명 및 가공 정밀도를 결정하는 공구의 파손과 심한 마모를 피하기 위하여 균일한 절삭력을 유지하게 해야 한다.<sup>5)</sup> 총형공구의 경사각, 여유각 그리고 절인 길이의 변량에 따라 총형공구에 작용하는 절삭력이 변화하며 총형공구의 공구수명도 다르게 나타나기 때문에 공구수명을 단축시키는 인자와 정밀도에 영향을 미치는 인자를 고려하여 절인의 형상을 설계하는 것이 가장 중요하다.<sup>6)</sup>

이에 본 연구에서는 고정밀 고무금형에 속하는 자동차용 배어링 러버실 금형 가공을 위한 총형공구의 효율적인 설계를 목적으로 실험계획법을 이용하여 주요 설계인자에 대한 특성치를 분석하였다.<sup>7)</sup> 총형공구의 설계에서 중요한 여유각, 경사각 그리고 절인의 길이를 설계인자로 고려하였는데, 총형공구의 수명에 영향이 큰 절삭력을 특성치로 선정하고, 평균 공구마모와 비교하였다. 실험은 반복이 있는 일원배치법에 의하여 실시되었으며, 분산분석(ANOVA)과 회귀분석을 통하여 각 요인에 대한 유의성과 최적 수준을 찾고, 공구수명을 예측하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치 및 조건선정

본 연구에서 사용된 총형공구는 상용 인서트팁(Insert tip: TaeguTec, SPKN 1203 EDR K10)을 재료로 W-EDM에 의하여 제작되었다. 총형공구의 절삭성을 평가 할 주요인자로는 Fig. 1에서 보여진 바와 같이 절인의 길이, 경사각 그리고 여유각을 설정하였으며, 각 인자는 모두 5수준으로 하여 반복 실시하였다. 총형공구의 형상은 제품의 형상에 기초하

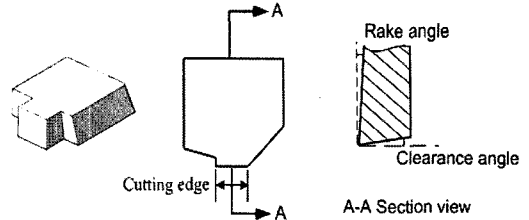


Fig. 1 Design formed tools

기 때문에 절인의 길이는 절삭력의 발생과 절인의 파손에 영향을 주며, 경사각은 칩과 공구사이의 마찰에 영향을 가지고, 여유각은 공구와 가공물 사이의 마찰과 관계되는 변수이기 때문에 선택되었다. 단위 형상의 수준은 현장의 경험에 의존하였으며, 고차 회귀모델의 추정을 위하여 결정하였다.

회전속도(spindle speed 300RPM), 이송속도(feed 3mm/min), 절삭깊이(depth of cut 0.01mm)의 값들을 고정인자로 선정하였다. 실험은 각 수준의 조합으로 1회씩 수행되는 것 보다 반복하여 행하는 것이 실험결과의 신뢰성을 높일 수 있기 때문에 9회 반복 시켜줌으로써 오차항의 자유도를 크게 해주었으며, 이에 오차분산의 정도가 좋게 추정되었다. Table 1은 실험을 위한 설계인자의 변화를 보여주고 있다.

피삭재는 실제 금형 생산에 사용되는 변형이 적고 경면 연마성이 우수한 초경면성 정밀 플라스틱 금형강(NAK80)이다. Table 2와 Fig. 2는 절삭력 측정을 위한 실험장치와 공구동력계(dynamometer; Kistler)규격을 보여준다.

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				

### 2.2 실험방법

배어링 러버실은 수백 $\mu$ m의 치수를 갖는 환(環)모양의 기하학적 형상을 가지고 있다.

Table 2 Specifications of experimental apparatus

Items	Specification
Machining center	Vertical type Spindle(max): 8000rpm
Tool dynamometer	Kistler 9257A Range : ±5kN Resolution : 0.01N
Charge amplifier	Kistler 5001 Resolution : 12bit

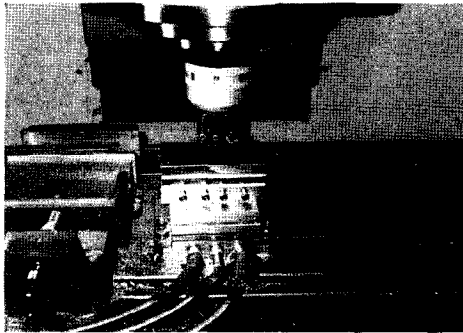


Fig. 2 Schematic apparatus of cutting force experiment

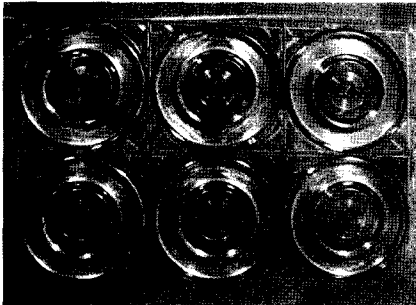


Fig. 3 Rubber seal die

이와 같은 형상을 고려하여 Fig. 3와 같이 리버실 금형은 다수의 동일한 캐비티를 배열한 것으로 이루어져 있으며 하나의 캐비티에서 얻어지는 X축, Y축 방향의 절삭력은 상호 증가와 감소를 반복하며 주기성을 가진 파형으로 나타난다. 절삭력은 임의의 시간동안 받아들여진 절삭력의 평균값으로 취하였으며 가공 시 발생하는 진동 및 노이즈 등은 절삭력 획득에 오차를 유발시키는 요인이 되므로 건식 절삭으로 수행되었다. 절삭력을 평가하기 위해 1개의 캐비티 내에서 동일 가공거리 만큼의 합력의 평균값을 산출하여 평가하였다. 또한 리버실 금형의 정밀절삭을 고려하여 Fig. 4와 같은 가공경로에 의

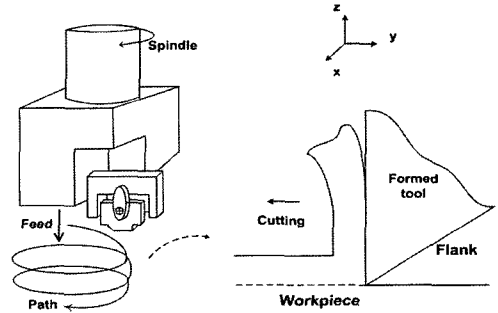


Fig. 4 Helical tool path

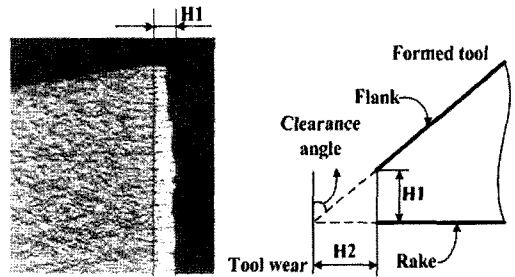


Fig. 5 Tool wear of formed tool

한 NC-CODE를 생성하였다.<sup>8)</sup>

공구마모는 공구와 피삭재 사이의 상대적인 경도의 함수관계를 나타내며, 경사면 또는 여유면의 수직응력과 연관되며 가공면의 가공 상태와 치수정밀도에 영향을 주는 인자이다.<sup>9)</sup> 일반적으로 공구수명은 여유면 마모(flank wear land)폭을 일정한 값으로 정한 후에 마모폭을 점검하여 결정된다. 하지만 일정한 여유면 마모폭으로 공구수명을 결정하는 경우는 경사각, 여유각 공구길이에 따라 치수정밀도에 영향을 미치는 정도가 다르게 된다. 그래서 여유면 마모폭과 공구수명, 치수정밀도와의 관계를 알아보기 위해 경사각, 공구길이, 여유각이 다른 공구로 동일거리를 가공한 후 공구마모 정도를 알아보았다. 여유면 마모폭(wear land)은 Fig. 5와 같이 여유면 마모 부위에서 여러 부분을 측정한 후 그 평균값(H1)으로 여유면 마모폭을 산출하고 H2로 마모를 평가하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

총형공구의 설계인자인 여유각, 경사각 그리고 절인의 길이의 변화에 따른 절삭력 변동을 파악하

고자 분산분석(ANOVA)을 실시하였고 유의성을 검증하였다. 또한 회귀분석에 의하여 각 인자를 독립 변수로 하는 회귀식을 추정하여 임의의 값에서의 절삭력 예측모델을 생성하였다.

### 3.1 절삭력 분석

#### 3.1.1 여유각

여유각은 가공물의 치수정밀도와 공구수명에 영향을 주는 인자라고 보여지며, Table 3에서는 여유각에 따른 절삭력의 변동을 보여주고 있다.

Table 3 Cutting force and clearance angles(kgf)

No.	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 4는 여유각의 변화에 따른 절삭력의 변동에 대한 분산분석한 결과를 보여주고 있다. 여유각은 유의수준 95%내에서 유의하다고 판단되며 총형공구의 설계 시 절삭력에 영향을 끼치는 주요 인자라고 생각된다. Fig. 6은 여유각에 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 5는 여유각에 대한 절삭력 변동을 예측하기 위한 다차 선형 회귀 분석 모델의 유의성을 보여주고 있다.

Table 4 ANOVA of cutting force on clearance angles

Ractor	S	Φ	V	F	F(0.05)
Clearance angle	136.60	4	34.15	20.90*	2.69
Error	65.36	40	1.63		
Total	201.96	44			

\* : 95% confidence level

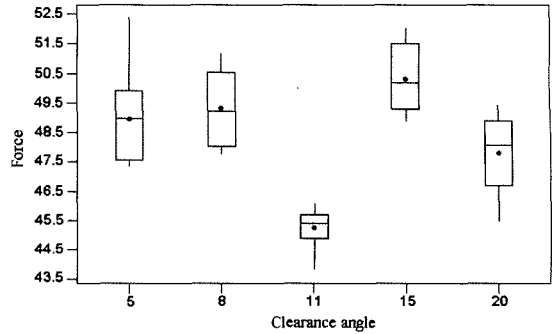


Fig. 6 Boxplots of force by clearance angle

Table 5 ANOVA of regression model on clearance angles

Factor	S	Φ	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 유의하다고 판단되지만 총 변동에서 회귀식에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율인 결정계수(coefficient of determination ; R)가 17.5%로 높지 않기 때문에 좋은 회귀식이라고 할 수 없다. 이는 회귀식을 추정하는데 있어서 절삭력 변동을 설명하는데 여유각만으로는 부족하다는 것을 의미한다. Table 6은 여유각에 따른 평균 공구마모를 보여주고 있는데, 절삭력과는 달리 여유각이 작을수록 공구마모가 적어짐을 알 수 있다. 이는 여유각이 크면 절삭성이 좋으나, 절인이 예리하기 때문에 공구마모가 빠르게 진행되어 공구 수명에 영향을 끼친다는 것을 의미한다.

Table 6 Tool wear on clearance angles

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

#### 3.1.2 경사각

Table 7과 8은 경사각에 따른 절삭력의 변동 및 분산분석한 결과이다. 경사각은 유의수준 95%내에서 유의하며, 절삭력의 주요인자라고 생각된다.

Fig. 7은 경사각에 대한 수준별 데이터의 분포를 나타낸 벤다이어그램이며, 4수준인 경사각 8°에서 절삭력 분포가 가장 낮은 것을 보여 준다.

Table 7 Cutting force and rake angles(kgf)

No.	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 8 ANOVA for cutting force of rake angles

Factor	S	Φ	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			

\* : 95% confidence level

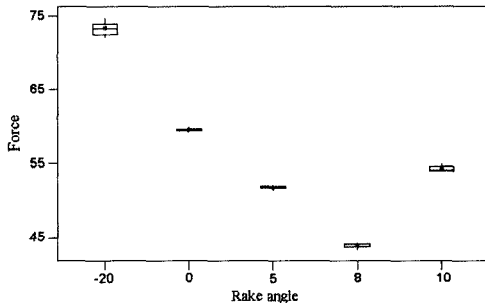


Fig. 7 Boxplots of force by rake angle

Table 9는 경사각에 대한 절삭력 변동을 예측하기 위한 다차 선형 회귀 분석 모델의 유의성을 보여주고 있다. 추정된 회귀식은 모두 유의하다고 평가되지만, 회귀식에 의하여 설명되는 결정계수가 92.7%인 3차  $y = 0.1x^3 + 0.12x^2 - 3.27x + 60.35$  회귀식이 적절하다고 판단된다.

Table 10은 경사각에 따른 평균 공구마모를 보여주고 있다.

Table 9 ANOVA of regression model on rake angles

Factor	S	Φ	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 10 Tool wear on rake angles

Rake angle	-20°	0°	5°	8°	10°
Wear	10 $\mu$ m	8 $\mu$ m	6 $\mu$ m	2 $\mu$ m	4 $\mu$ m

절삭방향과 전단면이 이루는 전단각이 크면 칩은 얇고 길게 되며, 전단각이 작으면 칩은 두껍고 짧게 되고, 전단면적이 크게 되므로 큰 절삭력이 필요하게 된다. 경사각이 크면 칩배출이 용이하고 칩과 공구사이의 마찰력을 줄일 수 있어 절삭력이 감소하며, 총형공구의 절인이 보다 예리하기 때문에 마모가 신속히 진행된다. 절인의 마모와 함께 절삭력이 커지면서 불안정한 절삭력이 공구에 작용하게 되며 이는 금형의 정밀도에 영향이 미친다. 경사각에 따른 절삭력을 분석해보면 경사각이 점차 증가함에 따라 절삭력은 감소하다가 10°에 도달하였을 때는 절삭력은 8°에 비하여 증가하였다. 이는 경사각이 증가함에 따라 칩이 더욱 잘 배출되는 동시에 절인이 보다 예리해졌기 때문에 일정한 경사각에 도달하였을 때는 마모도 신속히 발생하여 절삭력이 불안정한 추세를 보인 것이다.

### 3.1.3 절인 길이

총형공구는 가공될 제품의 형상에 기초하여 설계되기 때문에 상용공구에 비하여 절인의 길이가 길다. 절인이 길어지면 큰 절삭력으로 공구의 파손의 위험이 있기 때문에 절인의 길이를 적절하게 선정해야 한다. Table 11과 12는 절인의 길이에 따른 절삭력의 변동 및 분산분석을 한 결과를 보여준다.

절인 길이는 유의수준 95%내에서 유의하다고 판단되어 절삭력에 영향을 끼치는 인자라고 생각된다

Table 11 Cutting force and cutting edge length(kgf)

No.	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 12 ANOVA of cutting force on cutting edge length

Factor	S	Φ	V	F	F(0.05)
Length	30678.7	4	7669.7	723.82*	2.69
Error	423.8	40	10.6		
Total	31102.6	44			

\* : 95% confidence level

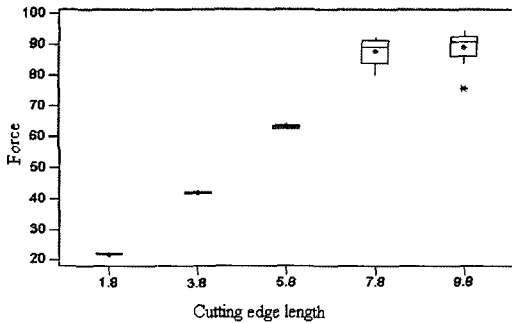


Fig. 8 Boxplots of force on cutting edge length

다. Fig. 8는 절삭력의 분포를 벤다이어그램으로 나타낸 것이다. 1수준인 절인의 길이 1.8mm에서 절삭력의 분포가 낮으며, 길이가 길어질수록 점차적으로 증가하는 추세를 보여주고 있다.

Table 13은 절인의 길이를 위한 선형 회귀모델의 유의성을 보여준다. 그중에서 결정계수 98.3%인 3차  $y = -0.25x^3 + 3.82x^2 - 6.09x + 22.37$  회귀식이 적절하다고 판단된다.

Table 13 ANOVA of 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 14는 절인 길이에 따른 평균 공구마모를 보여주고 있다.

Table 14 Tool wear on cutting edge length

Length	1.8mm	3.8mm	5.8mm	7.8mm	9.8mm
Wear	8 $\mu$ m	9 $\mu$ m	9 $\mu$ m	9 $\mu$ m	6 $\mu$ m

Fig. 8에서 절인 길이가 커짐에 따라 절삭력은 대체적으로 선형적인 증가 추세였다. 하지만 절인 길이가 7.8mm부터 불안정한 절삭력 증가추세였다. 이

는 절인 길이가 일정한 길이에 도달하였기 때문에 과대한 절삭력으로 공구마모를 동반하여 절삭력 증가의 선형적인 경향이 깨진 것이다. 불안정한 절삭력이 나타나는 이 시점을 절인 길이를 초과하지 않는 기준으로 하였다.

앞에서 절인의 길이, 경사각, 여유각의 변화에 따라 절삭력, 공구마모, 가공면 거칠기에 따라 총형공구를 평가하였다. Fig. 9는 다수의 캐비티를 갖고 있는 실제 러버실 금형 가공 시 러버실 형상에 따라 총형공구의 형상과 개수를 보여주고 있다. 러버실의 형상에 따라 절인을 하나로 설계하면 좋지만 절삭력과 마모를 고려 할 때는 그림과 같이 절인을 여러 개로 나누어서 설계한다. 그리고 마모가 빠르다고 예상되는 부분에는 총형공구의 개수를 증기시켰다.

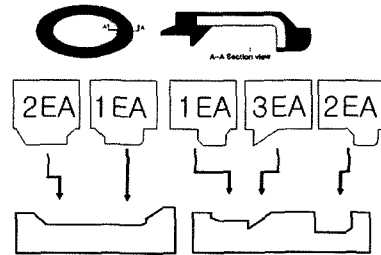


Fig. 9 Formed tools and rubber seal die

#### 4. 결론

본 연구에서는 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 설계 시 절삭력에 영향을 끼치는 인자들이며, 이 중에서 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 최적 설계를 통해서 insert type 총형공구를 이용한 러버실 금형가공에서 정밀도, 생산 효율성을 향상시켰다.

- 4) 다수의 캐비티를 갖는 러버실 금형을 가공 할 때 본 연구에서 고려한 여유각, 경사각 그리고 절인 길이를 고려하여 총형공구를 제작하였다.
- 5) 러버실 금형을 가공하기 위한 총형공구의 제작 과정에서 기존에 현장 경험에만 의거하던 설계에 기준치를 마련하였다.

### References

- 1) C. K. Kim and H. G. Kim, "Prediction of the Reaction Force for Seal Lip Design with Wheel Bearing Unit," Transactions of KSAE, Vol.12, No. 4, pp.33-41, 2004.
- 2) H. C. Kim, H. K. Lee, J. C. Huang, Y. S. Kong and G. E. Yang, "A Study on Machining Electrode for LED Mold," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol.19, No.10, pp.188-194, 2002.
- 3) H. K. Lee, Y. S. Kim, D. H. Kim, S. H. Roh and G. E. Yang, "A Study on Formed Tool to Machine Milli-structure Mold," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol.2, No.4, pp.5-10, 2003.
- 4) S. H. Roh, H. K. Lee, Y. S. Kim, D. H. Kim and G. E. 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, pp.21-26, 2004.
- 5) H. K. Lee, Y. S. Kim, D. H. Kim and G. E. Yang, "Precision Machining with Formed Tool for Milli-Scale Dies," 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing, pp.443-448, 2004.
- 6) L. H. Li, Y. S. Kim, D. H. Kim, G. E. Yang and S. D. Moon, "A Study on Machining for Bearing Rubber Seal Die," KSMTE Spring Conference, pp.42-47, 2004.
- 7) M. S. Kim, C. W. Lee, S. H. Son, H. J. Yim and S. J. Heo, "Shape Optimization for Improving Fatigue Life of a Lower Control Arm Using the Experimental Design," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.161-166, 2003.
- 8) J. Wang, C. Z. Huang and W. G. Song, "The Effect of Tool Flank Wear on the Orthogonal Cutting Process and Its Practical Implications," Materials Processing Technology, Vol.142, pp.338-346, 2003.
- 9) S. I. Kim, W. R. Lee and T. Y. Kim, "A Study on Machining Characteristics of Single-insert and Multi-insert Face Milling," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.12, No.4, pp.19-27, 1995.