

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구 조성비(ME93-E-04)에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 냉간단조품의 정밀도향상을 위한 금형해석 기법

김 태 형\*, 김 병 민\*\*, 최 재 찬\*\*

### Methodology of tool analysis to improve the accuracy of cold forged parts

T. H. Kim\*, B. M. Kim\*\*, J. C. Choi\*\*

#### ABSTRACT

In many metal forming processes, it is common to use stress rings for reducing elastic deformation and failures of forming dies. But, shrink fit of dies reduces the inner diameter of die insert, machining is required after shrink fit processes. The reduction of inner diameter can be predicted by the analysis of elastic-plastic finite element method. The dimension of dies before shrink fit can be determined to minimize or remove machining after shrink fit processes by deformation analysis of die. The computation of contacting stresses along die surface was analyzed by rigid plastic finite element method, and data were interpolated by the contact search algorithm. In this paper, we propose the analysis method of forging dies after shrink fit and forming to improve dimensional accuracy of final products.

**Key words** : shrink fit(억지 끼워 박음), elastic deformation of die(금형의 탄성변형), contacting stresses(접촉 응력), dimensional accuracy(치수 정도)

#### 기호설명

$D_i$  : 다이의 내경  
 $D_o$  : 다이의 외경  
 $D_m$  : 인서트의 외경  
 $S_{y1}$  : 인서트 재료의 항복강도

$S_{y2}$  : 보강링 재료의 항복강도  
 $E_1$  : 인서트 재료의 탄성계수  
 $E_2$  : 보강링 재료의 탄성계수  
 $\nu_1$  : 인서트 재료의 프와송비  
 $\nu_2$  : 보강링 재료의 프와송비  
 $P_m$  : 끼워박음에 의한 접촉면압

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계설계공학과

- $P_0$  : 평균 접촉면압
- $Z$  : 억지끼워박음량
- $Q$  : 분할 적경비 ( $\frac{D_s}{D_0}$ )
- $Q_1$  : ( $\frac{D_i}{D_m}$ )
- $Q_2$  : ( $\frac{D_m}{D_0}$ )

### 1. 서 론

금속성형법은 다른 가공법에 비해 가공속도가 빠르고 후속공정을 줄일 수 있기 때문에 널리 행해져 왔다. 오늘날에 와서는 종래의 대량생산 방식에서 탈피하여 다 품종 중·소량 생산방식이 주류를 이루고 있고, 특히 제품의 정밀도향상에 관심이 주목되고 있으며, 최근에는 인건비 상승, 전문인력의 부족 및 재료비 상승 등의 비용적 요인을 극복하기 위하여 원가 절감 및 품질 향상을 통한 제품의 경쟁력 확보가 가장 시급한 문제로 대두되고 있다. 따라서 소형부품의 경우 냉간상태에서 성형하여 후속의 기계가공없이 완제품으로 생산하여 재료의 절약, 가공공정수의 단축 등 냉간단조를 고부가가치 가공의 유력한 수단으로 응용하려는 추세에 있다.

냉간단조제품은 양호한 표면 마무리, 치수정밀도, 높은 강도 등의 장점이 있으나, 성형하중이 매우 높고 금형의 항복강도에 육박하는 큰 성형압력이 작용하므로, 금형의 파손이나 변형을 고려하여 설계하여야 한다.

특히 금형에 작용하는 압력이 높아질수록 금형의 탄성변형이 증가하므로 신뢰성있는 제품을 생산하기 위해서는 성형 후, 금형의 변형 및 제품의 치수를 예측하여 금형을 설계하는 것이 요구된다.

냉간단조제품의 치수정밀도에 영향을 미치는 인자들로 성형발열, 윤활, 재료, 소재의 표면조도, 어닐링 조건, 금형의 탄성변형 등이며 이중 금형의 탄성변형을 예측하는 것은 제품의 치수정밀도를 보장하기 위해서 아주 중요하다.

일반적으로 성형압력이 크게 작용하는 경우, 보강링(stress ring)을 사용하여 금형의 강도 및 탄성변형을 억제하고 있으나, 억지끼워박음으로 인한 금형의 수축량을 보정하기 위해 금형 내면의 절삭 또는 연마가공을 추가하고 있으며, 이러한 후속가공은 금형설계 기간의 연장 및 끼워박음 효과를 삭감시킨다는 의견이 제기되고 있다.<sup>(1)</sup>

금형의 변형을 해석하기 위하여 금형에 작용하는 압력을 정밀하게 계산하는 것이 필요하므로 최근에는 유한요소법을 이용하여 접촉압력을 정확하게 계산하려는 연구가 행해졌으며,<sup>(2-6)</sup> Yoneyama는 압출금형에 작용하는 압력을 광학섬유 변위계를 이용하여 윤활상태에 따른 금형 압력분포를 측정하였다.<sup>(7)</sup> 또한 보강링의 사용이 금형의 변형에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.<sup>(8-10)</sup> Sadeghi 등은 축대칭 부품의 성형 후 탄성회복량, 열변형 및 탄성변형을 고려하여 금형을 설계하는 근사적인 방법을 제시하였으며 성형온도가 낮아질수록 소재의 탄성회복량 및 열변형은 감소하나 금형의 탄성변형은 증가하므로 낮은 성형온도에서는 금형의 탄성변형이 금형 전체변형량에 지배적인 요인임을 실험으로 입증하였다.<sup>(11)</sup> 이러한 연구는 주로 금형의 탄성변형 및 응력해석에 그치고 있으며, 금형의 변형해석결과를 제품정밀도 향상에 적용한 경우는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 냉간압출가공시 제품의 치수정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 금형의 탄성변형에 주안점을 두었으며 금형(다이인서트 및 보강링)재질 및 치수가 제품의 치수정밀도에 미치는 영향을 조사하였고, 보강링의 사용시 금형의 수축량 및 성형 후 금형의 탄성변형량을 예측하여 금형의 후속가공을 최소화하고 최종제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있는 금형설계 기법을 제시하였다.

### 2. 최종제품의 치수제어 기법

본 연구에서는 최종제품의 치수제어를 위한 해석방법을 제시하고자 한다. 이러한 알고리즘은 Fig. 1과 같으며 입력단계에서는 소재와 금형재질 및 치수에 대한 정보, 최종제품의 치수, 성형방법 등을 입력하게 된다.

금형의 치수가 결정되면 강소성 유한요소해석으로 소재의 변형해석을 하게 되며, 이때 소재의 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 변환하게 된다. 변환된 압력정보를 이용하여 금형을 탄소성 유한요소해석하게 되며 금형의 최대변형량이 주어진 제품의 공차량을 초과하거나 금형 내부의 응력상태, 소성 변형의 발생 유무 등의 정보들을 토대로 보강링 사용 여부를 판단한다.

보강링의 사용시 인서트 및 보강링의 재료를 다시 입력 받아서 금형의 치수분할, 공차량 및 보강링에 의한 수축압력 등을 계산하여 새로운 금형치수를 결정 한 후,

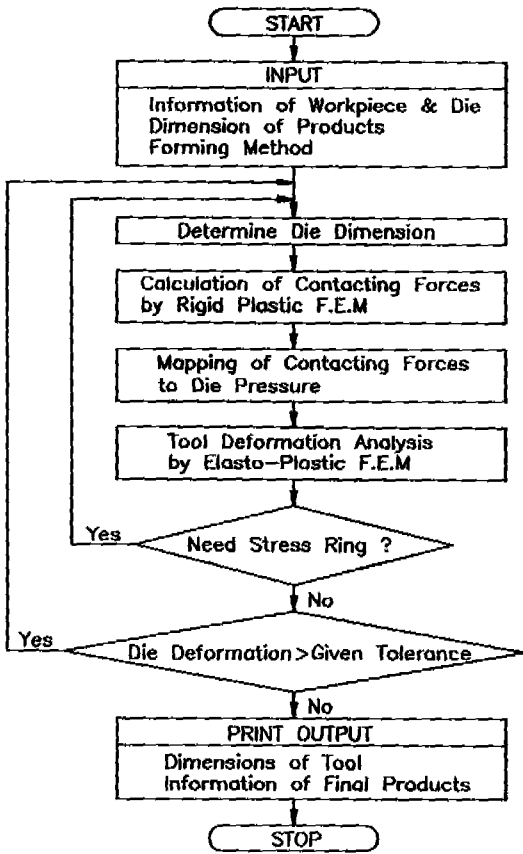


Fig. 1 Flow chart for analysis of die and workpiece to improve dimensional accuracy of forged parts.

다시 소재의 변형해석을 하게 된다. 금형의 해석을 거친 후 금형의 탄성변형량이 주어진 제품의 치수 공차량을 초과할 경우에는 최종제품이 원하는 치수공차 범위에 들 때까지 금형치수를 피드백하여 최종금형치수를 결정하며 금형의 탄성변형량이 공차량 이내일 때는 그 단계의 금형치수를 최종 금형치수로써 출력하게 된다.

금형의 내, 외경이 주어질 경우, Lamé의 식으로부터 보강링의 갯수에 따라 금형의 끼워박음면의 직경 및 끼워박음량을 결정할 수 있다.<sup>12)</sup> 보강링이 1개이며 인서트와 보강링의 재질이 다를 때 접촉면의 직경은 아래와 같다.

$$D_m = \frac{D_i}{Q_1} \quad (1)$$

보강링의 내경은 인서트의 외경보다 작은 값을 가지며, 이 차이량을 억지끼워박음량이라 칭하고 아래와 같이 계산된다.

인서트와 보강링의 재질이 같을 때의 억지끼워박음량은

$$Z = \left[ \frac{1}{E_2} \frac{1+Q_2^2}{1-Q_2^2} + \frac{1}{E_1} \frac{1+Q_1^2}{1-Q_1^2} \right] P_c D_i \text{이며} \quad (2)$$

여기서  $P_c = \frac{1}{2} \frac{1-Q_1^2}{1-Q_2^2} (S_{y2}(1-Q_2^2) - S_{y1}(Q_1^2 - Q_2^2))$  이다.

인서트와 보강링의 재질이 다를 때의 억지끼워박음량은

$$Z = \left[ \frac{(1-\nu_2)Q_2^2 + (1+\nu_2)}{E_2 + (1-Q_2^2)} + \frac{(1-\nu_1) + (1+\nu_1)Q_1^2}{E_1 + (1-Q_1^2)} \right] P_c D_i \text{이며} \quad (3)$$

Table 1 Material properties and calculated dimensions of dies

CASES	DIES	MAT.	HrC	$\nu$	E [N/mm <sup>2</sup> ]	S <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	etc. [mm]
WITHOUT STRESS RING		SKD61	42	0.3	212000.0	1100.0	
WITHOUT STRESS RING	INSERT STRESS RING	SKD1 SKD61	62 42	0.3 0.3	208000.0 212000.0	2150.0 1100.0	Z=0.39556 D <sub>m</sub> =49.604
WITHOUT STRESS RING	INSERT STRESS RING	GTI50 SKD61	87 42	0.22 0.3	540000.0 208000.0	3300.0 1100.0	Z=0.24856 D <sub>m</sub> =38.1

여기서  $P_c = \frac{1}{2} \frac{(1+Q^2)(1-Q^2)}{(1-Q^2)(1+Q^2)} (S_{y2}(1-Q^2))$  이다.

역지끼워박음에 의해 발생하는 반경방향의 접촉면압은 재료가 다를 경우 아래와 같이 구해진다.

$$P_m = \frac{Z}{R_m} \left[ \frac{1}{E_1} \left( \frac{(D_o/2)^2 + (D_m/2)^2}{(D_o/2)^2 - (D_m/2)^2} + \nu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left( \frac{(D_m/2)^2 + (D_1/2)^2}{(D_m/2)^2 - (D_1/2)^2} - \nu_2 \right) \right] \quad (4)$$

### 3. 치수제어 기법의 적용

본 연구에서 치수제어 기법을 전방압출공정에 적용하였다. 가공소재는 상온에서 풀림처리된 AISI 1010강이며, 해석에 이용된 금형재료는 SKD61이고 금형재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.<sup>(13)</sup>

#### 3.1. 전방압출공정의 유한요소해석

가공소재의 유동 관계식은  $\bar{\sigma} = 103.8\bar{\epsilon}^{0.22} [N/mm^2]$  이고, 초기소재의 치수는 직경 35.2 mm, 높이 35.2 mm 인 봉재이며 금형의 치수는 Fig. 2와 같다.

소재의 구속부 및 성형부에서 작용하는 압력분포를 금형해석에 이용하기 위해 초기소재 높이의 절반 정도의 스트로크에서 해석을 중단하였다. Fig. 3, 4는 감소성 유한요소해석 후, 성형하중과 금형에 작용하는 접촉면압을 나타낸 것이다. 금형에 작용하는 압력은 컨테이

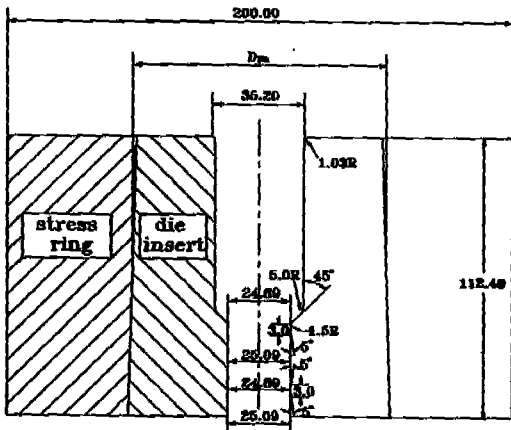


Fig. 2 Dimensions of forward extrusion die

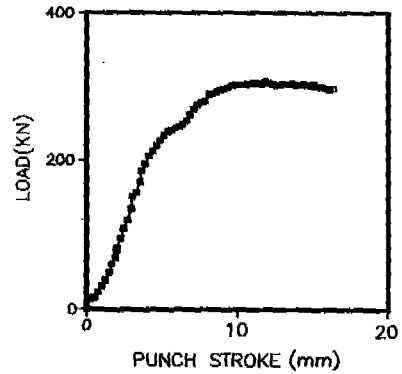


Fig. 3 Load vs. punch stroke curve

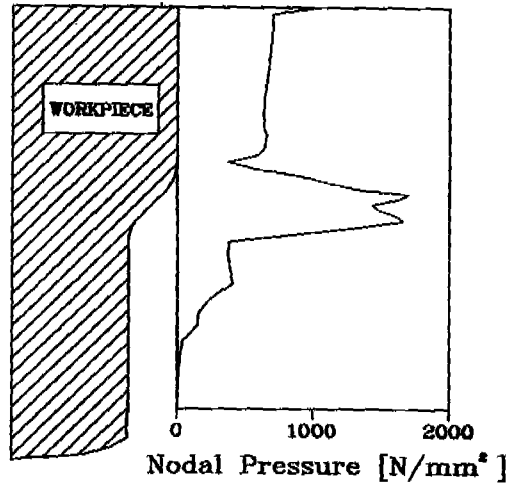


Fig. 4 Normal pressure distribution of die inner surface

너 벽면에서는 펀치와 소재의 접촉면에서 최대이며, 성형부의 시작 및 랜드부가 시작되는 곳에서 압력이 높음을 볼 수 있다.

일반적으로 금형의 절점과 소재의 절점이 일치하지 않으므로 금형해석을 위해서는 소재에 작용하는 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 변환하여야 한다. 이러한 소재의 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 보간하기 위한 절차는 다음과 같다. (Fig. 5)

① 소재의 절점이 금형에 접촉하고 있는지를 결정한다.

Fig. 5의  $P_w$ 는 소재의 경계에 있는 임의의 절점이며  $E_D$ 는 금형의 경계에 있는 임의의 요소이다.  $E_D$ 의 경계 절점을  $c, d$ 라 하고 그 변의 길이를  $L_D$ 라 하면 절점

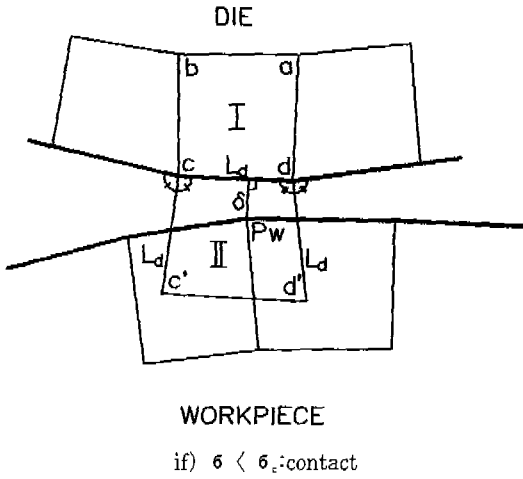


Fig. 5 Treatment of contact problem to transfer the nodal forces at workpiece to die

c, d에서 각을 이등분하고 길이가  $L_D$ 인 벡터의 종점은 각각  $c', d'$ 와 같다. 이때  $P_W$ 가 영역 I( $\square a, b, c, d$ ) 또는 II( $\square d, c, c', d'$ )내에 있다면  $P_W$ 에서 금형에 내린 수선의 길이  $\delta$ 를 구한다. 만약  $P_W$ 가 영역 I 또는 II내에 있고  $\delta$ 가  $\delta_c$ 보다 작다면  $P_W$ 는 금형요소  $E_D$ 에 접촉하고 있다고 간주하고  $E_D$ 에 접촉한 소재의 절점이 몇 개 있는지를 위와 같은 절차에 따라 구한다.

② 접촉절점의 경우 금형의 요소내에서 압력의 변화가 선형적이라고 가정하고 형상함수를 이용하여 소재의 절점력을 금형에 작용하는 압력으로 보간한다.

### 3.2 보강링을 사용하지 않은 금형의 해석

금형 접촉면압을 이용하여 금형을 탄소성 유한요소 해석하였다. 성형 후 금형의 탄성변형을 Fig. 6, 7에 나타내었다. 금형내면에서 변형이 가장 큰 곳은 펀치와 소재가 접촉한 면과 성형부에서이며 약 50  $\mu m$  정도 입을 알 수 있다.

금형의 응력분포를 Fig. 8에 나타내었으며 소재와 펀치가 접촉한 곳과 성형부에서 반경방향 및 원주방향의 응력집중현상이 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 사용하는 금형재료인 공구강, 고속도강 및 초경합금은 압축 항복강도보다 인장 항복강도가 아주 낮으므로 금형내부에 큰 인장응력이 발생하지 않도록 금형을 설계해야 한다.

보강링을 사용하지 않았을 경우, 원주방향응력이 금

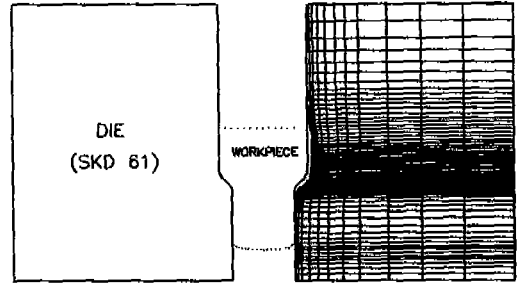


Fig. 6 Predicted die deformation during extrusion ( $\times 50$ )

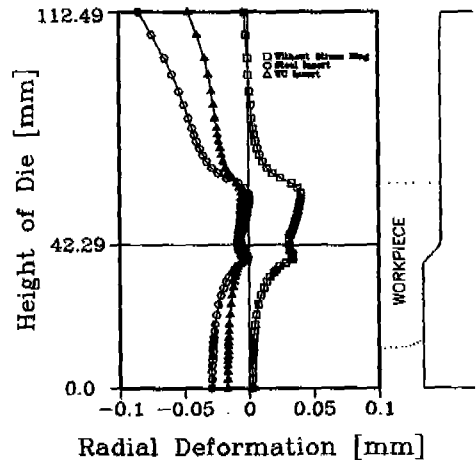


Fig. 7 Elastic deformation along die inner surface during extrusion

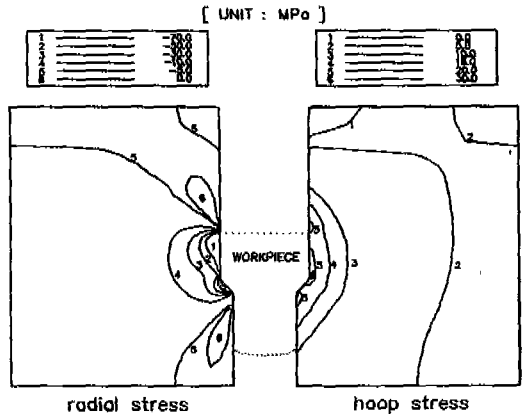


Fig. 8 Stress distribution of die without stress ring during extrusion

형 내부에서 인장상태임을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 금형의 조기파손을 방지하고 제품의 신뢰도를 높이기 위해서는 보강링의 사용이 필요함을 알 수 있다.

### 3.3 보강링의 설계

금형에 작용하는 압력이 클 경우 또는 금형의 수명 연장 등을 목적으로 보강링을 사용하는 경우가 보편적이다. 보강링의 역할은 금형에 예응력 (prestress) 을 부여하여 조기파손을 방지하며 성형압력에 의한 금형의 탄성변형을 억제한다.

본 연구에서는 보강링 재료를 SKD61로, 인서트 재료를 SKD1, GTi50으로 채택하였으며, 각각의 경우에 대하여 식 (1), (2), (3)으로부터 계산된 치수 및 인서트의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

### 3.4 억지 끼워 박음 해석

일반적으로 보강링 사용시 억지끼워박음이 용이하도록 테이퍼각을 둔다. 본 연구에서 테이퍼 각은 1°로 하였으며, 인서트와 보강링사이의 마찰계수를 0.3으로 하였다.

Fig. 9는 Table 1에 주어진 금형재료를 억지끼워박음을 했을 때 식 (4)를 이용하여 계산한 접촉면압의 분포를 도시한 것이며, 억지끼워박음량은 인서트가 공구강 (SKD1)인 경우보다 초경합금(GTi50)의 경우가 더 작

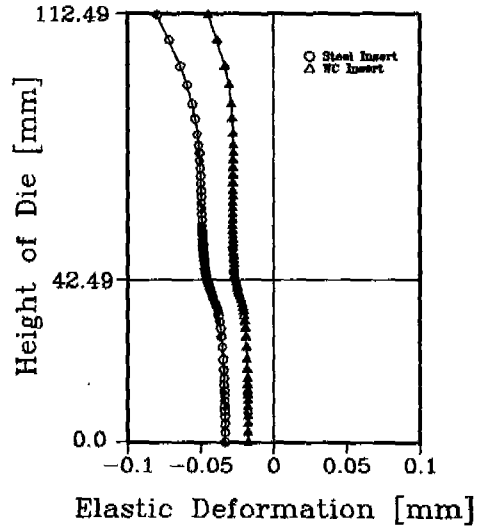


Fig. 10 Elastic deformation along die inner surface after shrink fit.

으나, 접촉면압은 반대로 초경합금의 경우가 더 큼을 볼 수 있다. 이러한 현상은 초경합금의 탄성계수가 공구강의 탄성계수보다 훨씬 큰 값을 가지기 때문이다.

Fig. 10은 억지끼워박음 후 인서트면의 내경수축량을 나타낸 것으로서, 수축량은 금형의 윗면에서 최대임을 알 수 있고, 인서트가 공구강인 경우가 초경 인서트의 경우보다 수축량이 더 큼을 볼 수 있다.

억지끼워박음에 의한 인서트의 수축량을 절삭 또는 연마하지 않으면 소재를 컨테이너에 위치시킬 수 없음을 짐작할 수 있다. 인서트와 보강링의 응력분포를 Fig. 11에 나타내었으며 인서트에 큰 압축응력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

### 3.5 보강링을 사용한 금형의 해석

Table 1에서 제시한 바와 같이 보강링 재질이 동일할 때, 두 가지 인서트 재질에 대하여 압출공정 후의 금형을 해석하였다.

Fig. 7은 금형인서트면에서의 탄성변형량을 나타내었으며, 인서트가 초경합금인 경우의 성형 후 금형의 변형량이 더 균일하고 최종제품의 치수를 결정하는 랜드부의 변형도 더 작음을 볼 수 있었으며, 공통적으로 보강링을 사용함으로써 랜드부 및 변형영역에서 금형의 탄성변형량을 현저하게 줄일 수 있었다.

성형 후의 인서트의 응력분포를 Fig. 12에 나타내었

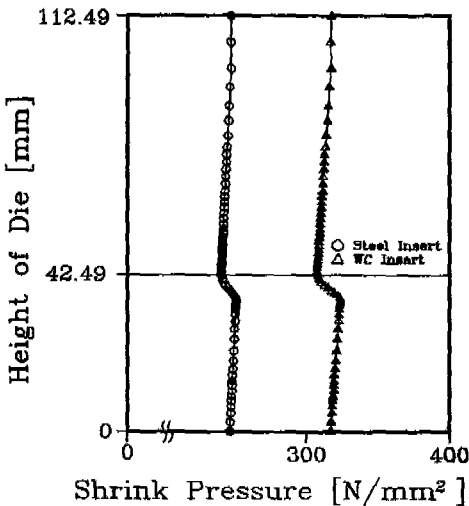
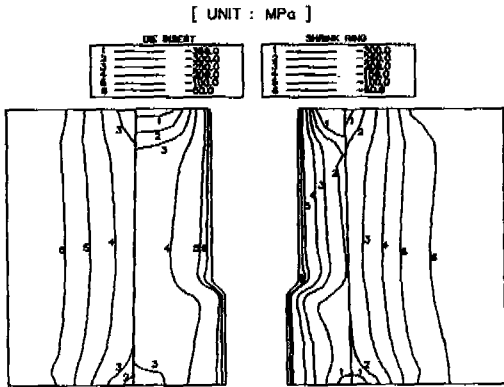
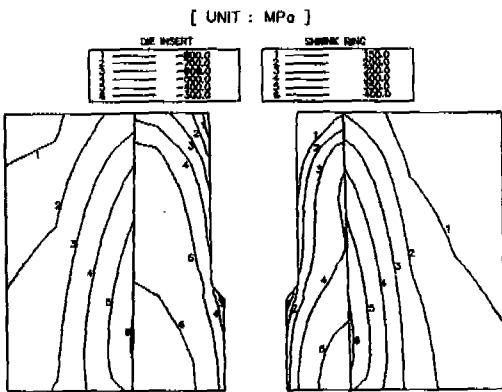


Fig. 9 Distribution of shrink pressure after shrink fit



(a) radial stress



(b) hoop stress

Fig. 11 Stress distribution of dies after shrink fit(left: steel insert, right: WC insert)

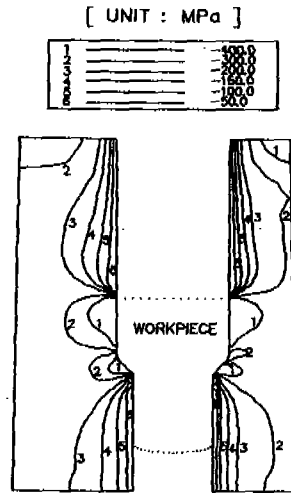
다. 반경방향응력(Fig. 12(a))은 소재와 펀치의 경계면 및 성형영역에서 가장 큰 압축응력을 보였으며, 원주방향응력(Fig. 12(b))은 펀치 경계면 및 변형영역에서 가장 낮은 압축응력을 나타내었다.

이러한 결과에서 보강링을 사용한 금형은 성형 후에도 금형내부에서 인장응력이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 즉 보강링을 사용하면 금형의 강도가 향상될과 동시에 더욱 정밀한 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

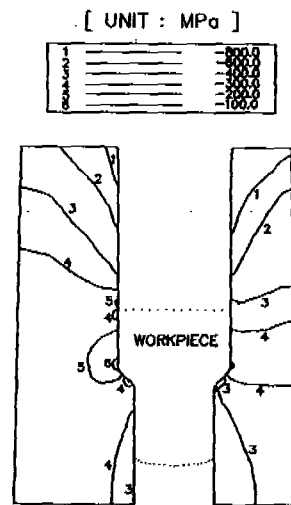
### 3.6 적용 결과

이상의 결과에서 보강링의 사용은 금형의 탄성변형량을 억제하고 금형에 예응력을 부여하므로 금형의 강도 및 제품의 치수정밀도가 개선됨을 알 수 있었다. 그러

나 보강링의 사용으로 인한 금형내부의 수축은 절삭 또는 연마 등의 마무리 가공으로 치수를 보정하게 된다. 금형의 마무리 가공은 거의 수작업으로 이루어 지며 시간 소요가 많은 작업이므로, 금형의 설계시 이러한 수축량을 고려하여 금형의 후처리를 줄이는 것이 요구된다. 또한 금형설계시 성형 후 금형의 탄성변형량을 보



(a) radial stress



(b) hoop stress

Fig. 12 Stress distribution of die insert during extrusion(left: steel insert, right: WC insert)

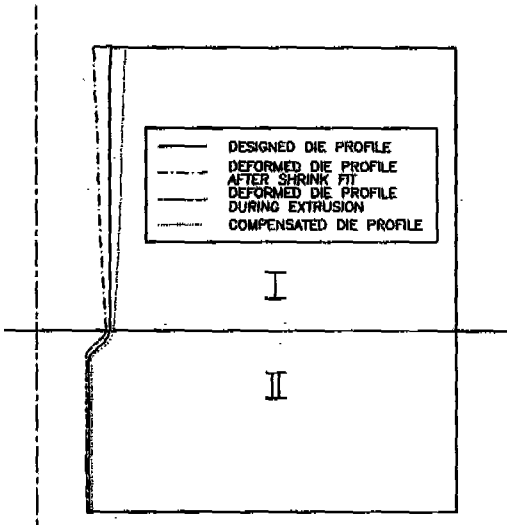


Fig. 13 The control method for die dimensions to improve the dimensional accuracy of cold forged parts

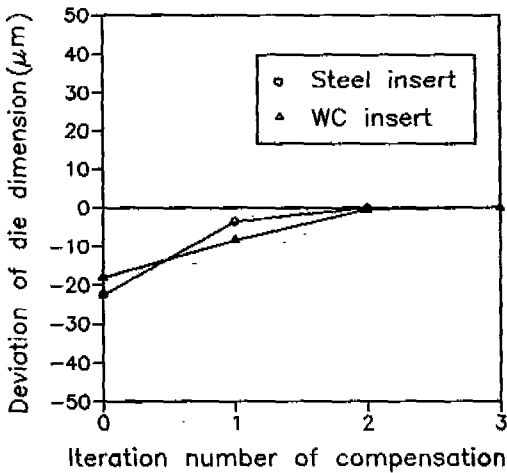


Fig. 14 Variation of product dimension after compensation of die dimensions

정하면 제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 최종제품의 치수제어를 위한 하나의 예로써, 랜드부를 빠져나온 소재의 치수 제어에 초점을 맞추어 해석하였으며, 금형의 치수제어방법은 Fig. 13 과 같다. 금형의 소재구속부(영역 I)에서는 보강링을 억지끼워박았을 때의 수축량을 보정하여 억지끼워박

음 후 소재의 직경과 금형내경이 일치하도록 하였으며, 금형의 천이영역과 랜드부(영역 II)에서는 보강링을 사용한 금형의 압출중 금형의 탄성변형량을 보정하여 제품의 치수가 주어진 공차량내에 들 때까지 금형의 치수를 반복적으로 보정하여 금형을 해석하였다. 따라서 이러한 방법은 보강링의 억지끼워박음 후 금형의 후가공을 줄이는 동시에 제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있었다.

Fig. 14는 위와 같은 기법을 이용하여 금형의 치수를 보정하여 반복 해석하였을 때 최종제품의 치수편차량의 변화를 나타낸 것이다. 측정된 치수편차량은 요구되는 최종제품의 직경과 보강링을 사용한 금형의 압출공정중 랜드부의 평균내경과의 차이값이다. 보강링을 사용한 금형에서 성형된 제품의 치수편차량은 약 20 μm 정도임을 알 수 있었다. 최종제품 직경의 공차 범위를 1 μm로 하였을 때, 금형치수를 2~3회 보정하여 해석한 결과 원하는 치수의 제품을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 금형의 탄성변형량만을 보정하여 제품의 치수정밀도를 향상시키도록 하였으나, 성형 후 소재의 탄성회복량 및 열변형 등의 영향이 큰 공정에서는 위와 같은 기법을 이용하여 금형의 탄성변형량 및 소재의 탄성회복량, 열변형을 보정하여 반복 해석하면 원하는 치수의 제품을 얻을 수 있다.

#### 4. 결 론

강소성 및 탄소성 유한요소법을 이용하여 소재와 금형의 변형을 해석하였다. 본 연구에서는 냉간단조품의 정밀도 향상을 위한 금형해석 기법을 개발하였으며, 아래와 같은 결론을 제시하고자 한다.

1). 보강링을 사용한 금형은 보강링을 사용하지 않은 금형보다 변형량이 더 균일하며 제품의 치수편차량도 더 작음을 알 수 있었다.

2). 금형 설계시 보강링 사용으로 인한 수축량 및 성형 후 금형의 변형량을 보정하여 금형을 설계하는 방법을 제시하였다.

3). 요구되는 제품의 치수 공차량을 얻기 위해서는 금형의 치수보정을 통하여 금형설계를 함으로써 제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있었다.



참고문헌

1. 鹿島幸太郎, 鑄鍛造と熱處理, 1993. 2.
2. Lange, K., "On the stress distribution in prestressed extrusion dies under non-uniform distribution of internal pressure", *Int. J. Mesh. Sci.*, Vol.27, No.3, pp.169~175, 1985.
3. Hwang, S. M., et al, "A penalty rigid-plastic finite element method for the determination of stress distributions at the tool-workpiece interfaces in metal forming", *Trans. of NAMRI/SME*, pp.13~19, 1990.
4. Yoon, J. H., et al, "Treatment of contact traction at the die-workpiece interface for the elastic analysis of die deflection", *Int. J. Mesh. Sci.*, Vol.34, No.9, pp.689~702, 1992.
5. Hirai, T., et al, "Plastic metal flow under frictional boundary in forward extrusion die stress and stress distribution of the die", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.26, No.3, pp.217~229, 1986.
6. Wang, X. W., et al, "Experimental and theoretical determination of container", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.1, pp.539~544, 1987.
7. Yoneyama, T., et al, "Experimental and theoretical determination of container", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.1, pp.553~558, 1993.
8. Frater, J. L., "Application of finite element methods to the design of prestressed tooling", *J. Mater. Shaping Technol.* Vol.7, No.1, pp.49~55, 1989.
9. Takahashi, s., et al "Forging die stress analysis using boundary element method". *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.1, pp.203~210, 1990.
10. Zhang, X. H., "Finite element analysis of container and accuracy control of extrusion products", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.1, pp.343-348, 1990.
11. Sadeghi, M. H., et al, "Analysis of dimensional accuracy of precision forged axisymmetric components", *Proc. Instn. Mech. Engrs.* Vol.205, pp.171~178, 1991.
12. 김형섭, "퍼스널 컴퓨터를 이용한 냉간단조 공정설계 및 금형설계의 자동화 시스템에 관한 연구", 부산대학교 박사학위 논문, 1990.
13. Cold forging data sheet, "Tool steel dies for the cold forging of steel" ISME, No 70003, 1970.