

정밀 냉간단조 금형설계를 위한 보강링의 영향

허관도*, 최영**, 여흥태***

The Effect of Stress Ring for the Design of Precision Cold Forging Die

Kwan Do Hur*, Young Choi**, Hong Tae Yeo***

ABSTRACT

The dimensional accuracy of the cold forged part is depended on the elastic characteristics of the die. To increase the stiffness of the prestressed die, the first stress ring of the tungsten carbide alloy (WC) is considered. For the design, Lamé's equation is used. Diameter ratios and interferences have been determined by maximum inner pressure without yielding of materials. The design of the prestressed die has been compared with the conventional one. For the comparison, the FE-analysis using ANSYS has been performed. The results indicate that the prestressed die with the high stiffness can be obtained by the using the high stiffness material as the first stress ring.

Key Words : Prestressed precision die(예압된 정밀금형), First stress ring(첫 번째 보강링), Die deformation(금형 변형), Diameter ratio(분할직경비), Interference(간섭량), Stiffness(강성)

기호설명

D_i = inner diameter of Dies
 D_o = outer diameter of Dies
 p_o = inner pressure
 $Q = D_i / D_o$ = total diameter ratio
 Q_k = diameter ratio of the k^{th} ring
 Y_k = yielding stress of the k^{th} ring
 $\delta_k = z_k / 2$ = interference at the k^{th} interface

1. 서론

일반적으로 냉간단조는 다른 프레스 가공에서

는 볼 수 없는 큰 압력에서 작업하므로 금형의 파손 및 마모, 응력집중들이 국부적으로 생기기 쉽고 금형에 탄성변형이 생겨 정밀제품을 생산하기 어려운 경우도 발생할 수 있다. 이와같은 금형의 파손을 방지하기 위해 보강링을 사용하여 다이 인서트를 예압하여 사용한다. 이와같은 보강링으로 예압된 경우 이전의 연구에서 예압된 금형의 첫 번째 보강링의 강성이 보강효과에 중요한 인자로 작용함을 알 수 있었다¹⁾.

금형재료 중 초경합금은 일반적으로 다이 인서트용으로 많이 사용되고 있다. 그러나 인장응력에 취약하므로 인장의 원주방향응력이 발생하지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 그러므로 금형을 바깥

*** 2001년 5월 3일 접수
* 동의대학교 기계산업시스템공학부 기계공학전공
** 인제대학교 기계자동차공학부
*** 동의대학교 일반대학원 기계공학과

에서 안으로 보강링 및 다이 인서트를 조립한다면 첫 번째 보강링을 초경합금으로 하는 것이 가능하다.

이와같이 본 연구에서는 금형의 강성을 증가시키기 위해 첫 번째 보강링을 초경합금으로 하여 단조 다이 인서트의 변형을 최소화하는 정밀 냉간 단조 금형의 설계방법을 제안하려고 한다.

2. 금형설계

2.1 직경 결정 방법

본 연구에서 직경결정은 최대 내압이 작용할 때 다이 인서트와 보강링이 동시에 항복하는 조건과 초경합금을 사용한 경우는 원주방향으로 인장응력이 발생하지 않는 범위에서 결정하도록 Lamé의 식을 이용하여 구성하였다^[2-4]. 여러 개의 링으로 된 금형에서 내압 p_0 와 외압 p_n 이 작용할 때 접촉압력들은 Fig. 1과 같다. 빗금친 부분은 초경으로 사용되는 링의 위치를 나타낸다.

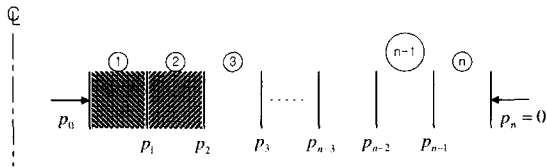


Fig. 1 Schematic illustration of compound ring

금형의 재료가 모두 공구강인 경우와 다이 인서트만 초경합금일 경우는 이전의 식들^[4]을 사용하였고 보강링이 초경합금일 경우는 기존식을 변형하여 다음과 같이 사용하였다. 각 링이 동시에 항복하는 조건으로부터 첫 번째 보강링②에 작용하는 외압은 다음과 같다.

$$p_2 = \sum_{k=3}^n \frac{Y_k}{2} (1 - Q_k^2) \quad , (k = 3 \sim n) \quad (1)$$

$$Q = Q_1 Q_2 \dots Q_n \quad , (Q < Q_k < 1) \quad (2)$$

1) 다이 인서트①은 공구강이고 첫 번째 보강링②가 초경합금일 때

$$p_1 = \frac{\sum_{k=3}^n Y_k}{1 + (n-1)(Q_2^0)^2} \quad (3)$$

$$Y_1 Q_1^2 = \frac{2p_1}{(1+Q_2^0)} Q_2^2 = \frac{2Y_k}{(1+Q_2^0)} Q_k^2 \quad (4)$$

$$p_0 = p_1 + \frac{Y_1}{2} (1 - Q_1^2) \quad (5)$$

2) 다이 인서트① 및 첫 번째 보강링②가 초경합금일 때

$$\frac{p_0 Q_1^2}{(1+Q_1^2)} = \frac{p_0 Q_1^2}{(1+Q_2^0)} = \frac{2Y_k Q_k^2}{(1+Q_1^2)(1+Q_2^0)} \quad (6)$$

$$p_0 = \frac{2}{(1+Q_1^2)} p_1 \quad (7)$$

여기서 분할직경비를 구하기 위해 먼저 식(2)의 관계에 의해 구간 $Q < Q_2 < 1$ 을 10^6 등분하여 분할직경비의 초기값을 식(8)과 같이 두고 i 를 1부터 10^6 까지 1씩 증가시켜 식(3)으로 압력을 구하고 식(4) 및 식(6)에서 나머지 분할직경비를 구한 후 식(2)에 대입하여 새로운 Q_2 를 구한다. 이 과정을 반복하여 전체 구간에서 $|Q_2^i - Q_2|$ 가 최소값을 갖는 Q_2^i 를 분할직경비로 선택하였다. 이때 최대 내압은 식(5)와 식(7)에 의해 각 경우에 대해 계산된다.

$$Q_2^i = Q + i \cdot \lambda \quad , \lambda = (1 - Q) / 10^6 \quad (8)$$

2.2 간섭량 결정 방법

내압의 변화에 따른 간섭량의 변화를 고려하여 간섭량의 선택 범위를 결정하였다. 먼저 분할직경비가 결정되면 간섭량의 변화에 따른 다이 인서트를 포함한 각 링의 항복여부를 체크하였다. 이때 바깥에서 안쪽으로 체결한다는 가정 하에 수행하였다. 그러므로 각각의 링이 체결된 후 내압과 외압은 0인 상태에서와 모든 링이 체결된 후 소재의 변형에 의해 작용하는 내압에 대해 안전한 최대 간섭량을 결정하였다.

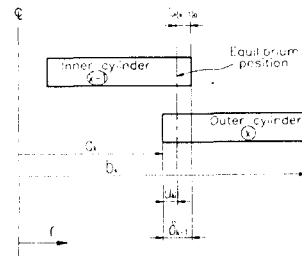


Fig. 2 Schematic illustration of shrink fitting

Fig. 2는 두 개의 링을 끼워맞춤할 경우 접촉면에서의 반경 변화를 나타내고 있다. 실제 정확한 끼워맞춤 후의 접촉면의 반경을 모르기 때문에 각각의 초기 직경으로 먼저 설정하고 간섭량의 조절은 외경을 가공하는 것이 편리하므로 접하는 링의 내경에 간섭량을 더한 값으로 외경을 설정하였다.

식(9)는 두꺼운 원통에 압력이 작용시 반경방향의 변위를 나타낸다.

$$U_k = \frac{1-\nu_k}{E_k} \frac{(Q_k^2 p_{k-1} - p_k)r}{(1-Q_k^2)} + \frac{1+\nu_k}{E_k} \frac{(p_{k-1} - p_k)a_k^2}{(1-Q_k^2)r} \quad (9)$$

원통의 내면 $r = a_k$ 에서 변위는 식(10)과 같고

$$U_{ki} = A_{ki} p_{k-1} - B_{ki} p_k \quad (10)$$

$$A_{ki} = \frac{(1-\nu_k)Q_k^2 a_k + (1+\nu_k)a_k}{E_k(1-Q_k^2)}$$

$$B_{ki} = \frac{2a_k}{E_k(1-Q_k^2)}$$

원통의 외면 $r = b_k$ 에서 변위는 식(11)과 같다.

$$U_{ko} = A_{ko} p_{k-1} - B_{ko} p_k \quad (11)$$

$$A_{ko} = \frac{2Q_k^2 b_k}{E_k(1-Q_k^2)}$$

$$B_{ko} = \frac{(1-\nu_k)b_k + (1+\nu_k)Q_k^2 b_k}{E_k(1-Q_k^2)}$$

n 개의 링으로 구성된 경우 접촉조건에 의해 n 과 $n-1$ 번째 링의 접촉시 간섭량은 다음과 같고

$$\delta_{n-1} = U_{ni} - U_{(n-1)o}$$

$$= \{A_{ni} + B_{(n-1)o}\} p_{n-1} - B_{ni} p_n - A_{(n-1)o} p_{n-2}$$

$$\delta_{n-2} = \{A_{(n-1)i} + B_{(n-2)o}\} p_{n-2} - B_{(n-1)i} p_{(n-1)} - A_{(n-2)o} p_{n-3}$$

$$\vdots$$

$$\delta_1 = \{A_{2i} + B_{1o}\} p_1 - B_{2i} p_2 - A_{1o} p_0$$

여기서, p_0 와 p_n 는 알고 있는 압력이다. 그러므

로, n 번째와 $n-1$ 번째 링에서부터 역으로 압력을 대입하면 식(12)와 같이 접촉압력을 구할 수 있다.

$$p_{k-1} = \frac{\delta_{k-1} + A_{(k-1)o} p_{k-2} + B_{ki} p_k}{A_{ki} + B_{(k-1)o}} \quad (12)$$

$$(k = 1 \sim n)$$

이와같이 접촉압력을 구한 후 초기 직경에 대해 각각의 링의 항복여부를 판단하여 사용 가능한 간섭량을 선택할 수 있다.

3. 단순 밀폐 업셋팅에 대한 적용

첫 번째 보강링이 초경합금인 경우에 대해 기존의 방법과 비교하기 위하여 간단한 밀폐 업셋팅에 대해 적용하였다. 사용하는 금형의 재질은 다음의 Table 1과 같고 금형의 구성은 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical properties of materials

| Mat. | HrC | E(GPa) | S _y (MPa) | ν |
|-------|-----|--------|----------------------|-------|
| GTi50 | 87 | 540 | 3300 | 0.22 |
| STD11 | 58 | 209 | 1650 | 0.30 |
| STD61 | 50 | 212 | 1300 | 0.30 |

Table 2 Suggested cases for die configuration

| Case | Insert | S-Ring 1 | S-Ring 2 |
|------|--------|----------|----------|
| 0 | STD11 | STD61 | STD61 |
| 1 | GTi50 | STD61 | STD61 |
| 2 | STD11 | GTi50 | STD61 |
| 3 | GTi50 | GTi50 | STD61 |

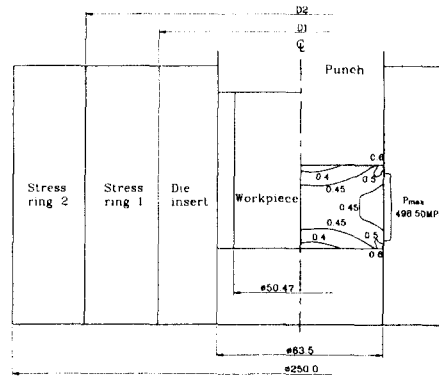


Fig. 3 Configuration of die set and contact pressures

업셋팅용 소재의 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 193.76 \bar{\epsilon}^{0.2593} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

Fig. 3은 업셋팅 해석을 위한 금형구성과 해석 결과 내면에 작용하는 접촉압력을 나타내었다. 초기 소재의 직경은 50.8mm 이고 높이는 50mm이다. 금형의 내경은 63.5mm 이고 외경은 250.0mm 로 하였다. 이때 밀폐 업셋팅시에 금형의 내면에 작용하는 압력은 DEFORM 으로 성형해석하여 그 결과 중 반경방향의 최대압력 498.50MPa 를 사용하였다. 다음의 Table 3은 앞에서 언급한 직경결정 방법에 의해 결정된 직경 및 최대내압을 나타내었다.

Table 3 Calculated diameters and maximum inner pressures

| Case | D ₁ (mm) | D ₂ (mm) | Max. Inner Pressure (MPa) |
|------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| 0 | 108.56 | 164.74 | 1278.21 |
| 1 | 95.26 | 154.32 | 1114.89 |
| 2 | 122.23 | 138.15 | 1109.41 |
| 3 | 89.25 | 125.44 | 858.38 |

Table 4는 최대내압을 견디는 간섭량과 보강 후 금형의 내경의 변화를 고려하여 내경을 수정하여 초기 내경과 같게 한 후 내압이 작용할 때 내경의 변화량을 나타내었다.

Table 4 The selected interferences and deformation of inner diameter

| Case | z ₁ (=2 δ ₁) | z ₂ (=2 δ ₂) | Deformation of inner dia. |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 0 | 0.3782 | 0.5709 | 0.217522 |
| 1 | 0.3515 | 0.5897 | 0.113967 |
| 2 | 0.0010 | 0.6304 | 0.199276 |
| 3 | 0.0362 | 0.5798 | 0.095164 |

이 결과로 볼 때 경우 1보다는 경우 3이 내경 변화량이 더 적다는 것을 알 수 있었고 경우 0보다 경우 2가 효과적임을 알 수 있었다.

4. 일반적인 냉간 금형에 적용

본 연구에서는 자동차에 장착되는 부품으로 성

형공정중 일부분에 대해 성형해석과 금형해석을 수행하였다. Fig. 4는 본 연구에서 선택한 공정의 금형과 펀치의 주요부분의 치수를 나타낸다.

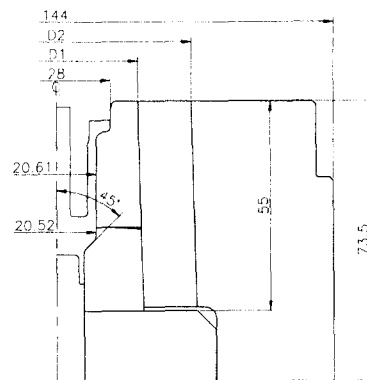


Fig. 4 Dimension of die and punch

4.1 직경 결정

앞의 식에 의해 분할직경비를 구하기 위해 Table 5의 재료를 이용하였다. Table 6는 금형 구성에 대해 여러 경우에 대한 재료를 나타냈다. Table 7은 각 경우에 대해 앞의 식으로 구한 분할직경비를 나타낸다.

Table 5 Mechanical properties of materials

| Mat. | HrC | E(GPa) | S _y (MPa) | ν |
|-----------------|-----|--------|----------------------|------|
| GTi50 | 84 | 450 | 2900 | 0.24 |
| STD61(S-ring 1) | 56 | 212 | 1550 | 0.30 |
| STD61(S-ring 2) | 50 | 212 | 1300 | 0.30 |
| STD11 | 60 | 209 | 1950 | 0.30 |

Table 6 Suggested cases for die configuration

| Case | Insert | S-ring 1 | S-ring 2 | Backplate |
|------|--------|----------|----------|-----------|
| 1 | GTi50 | STD61 | STD61 | STD11 |
| 2 | STD11 | GTi50 | STD61 | STD11 |
| 3 | GTi50 | GTi50 | STD61 | STD11 |

Table 7 Diameter ratios of die set

| Case | Q ₁ | Q ₂ | Q ₃ | Q |
|------|----------------|----------------|----------------|--------|
| 1 | 0.4984 | 0.5117 | 0.5587 | 0.1425 |
| 2 | 0.4627 | 0.6457 | 0.4770 | 0.1425 |
| 3 | 0.5674 | 0.5674 | 0.4427 | 0.1425 |

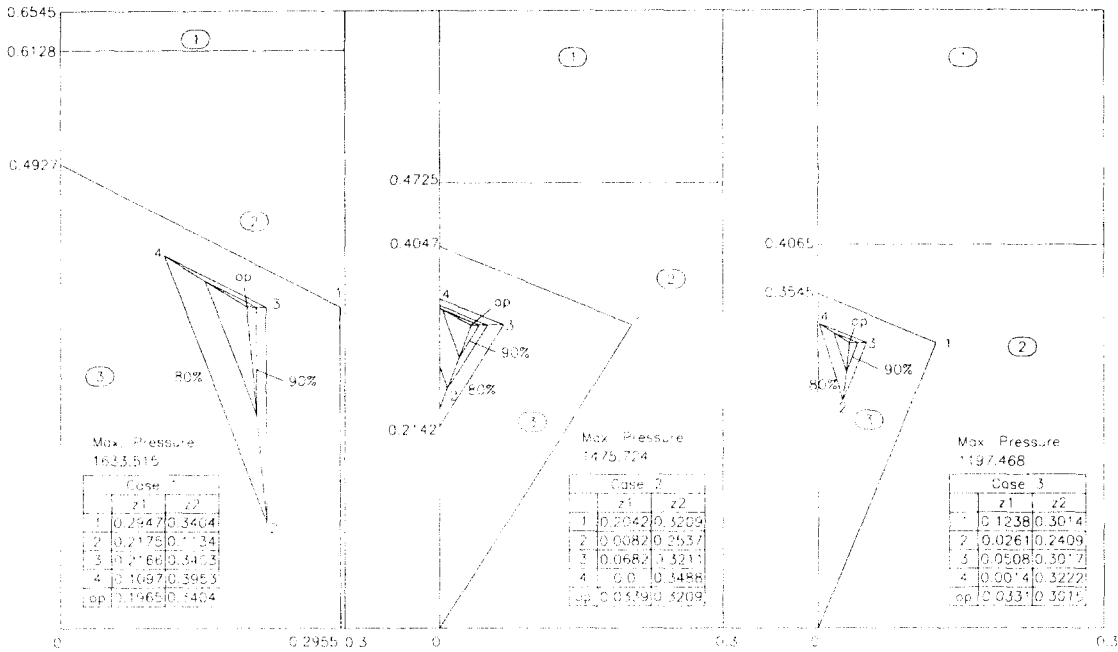


Fig. 5 Determination of interferences according to the change of inner pressure

4.2 간섭량 결정

각각의 직경 및 최대 내압에 대해 등간격으로 하한에서 상한까지 간섭량 변화에 따른 보강링의 체결과정 및 내압이 작용할 때 Lamé의 식을 이용하여 항복여부를 판별하였다. 그 결과는 Fig. 5와 같다. 타원 기호 1은 첫 번째 보강링과 두 번째 보강링을 체결할 때 항복하는 영역이고 2는 체결된 두 개의 보강링과 다이 인서트를 체결할 때 항복하는 영역, 3은 체결된 규형에 내압이 작용할 때 항복하는 영역이다. 그림에서 삼각영역은 최대 내압의 90, 80%를 작용시켰을 때 안전한 영역을 나타낸다. 본 연구에서는 각 끝점을 연결하여 만나는 점(op)을 간섭량으로 선택하였다. 이와 같은 결과에서 다이 인서트에 작용하는 압력에 따라 선택 가능한 간섭량의 변화 영역을 판단할 수 있고, 또한 보강시에 유효한 간섭량을 영역내에서 선택할 수 있다.

4.3 성형해석

Fig. 6은 강소성 유한요소 해석 코드인 DEFORM¹⁵⁾으로 해석한 전 공정에 대한 하중-변위선도이다. 가공소재는 STS410으로 유동응력식은 식(14)와 같고 마찰조건은 전단마찰상수 m=0.1로 하였다.

$$\bar{\sigma} = 960 \bar{\epsilon}^{0.10} \quad [\text{MPa}] \quad (14)$$

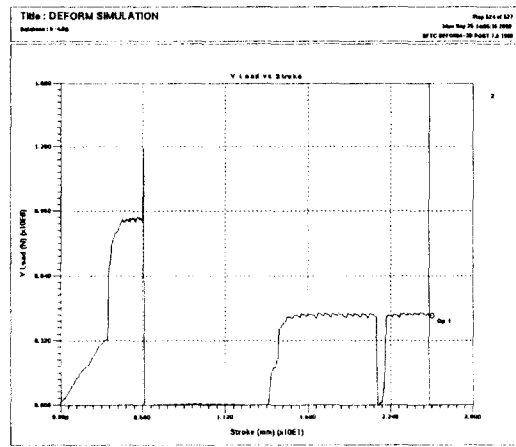
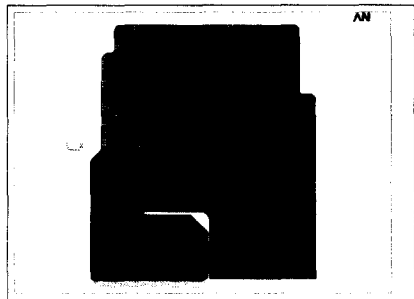
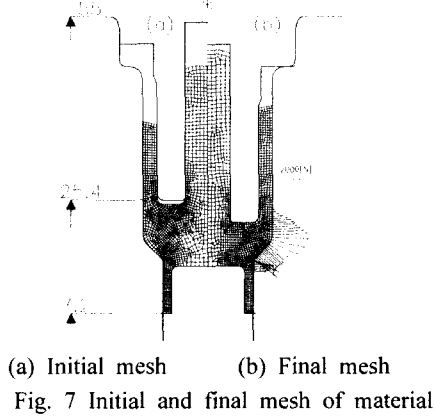


Fig. 6 Load-stroke diagram of processes

본 공정의 초기의 소재 형상과 성형 후 형상을 Fig. 7(a), (b)에 나타내었다. 작은 화살표로 표시된 것은 소재에서 다이 인서트에 작용하는 절점력을 나타낸 것이고, 수직 화살표는 다이 인서트 밑면으로부터의 높이를 나타낸다.

4.4 금형해석

Fig. 7(b)에서 다이 인서트의 강체를 금형해석을 위한 탄성격자로 변경하고 DEFORM의 해석 결과 중 절점력을 보간하여 ANSYS^[6] 해석시 입력되는 절점력으로 사용하였다. Fig. 8은 금형의 유한요소 격자 및 경계조건들을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 다이 인서트 내면의 변위를 관찰하기 위해 같은 위치에 절점을 만들고, 금형세트를 ANSYS에서 접촉요소를 적용한 탄성해석을 수행하였다.



5. 해석결과 및 고찰

Fig. 9과 10은 보강 후 및 단조 최종단계에서 다이 인서트 내면의 변형을 보강 전 형상에 대한 변위로 각각 나타낸 것이다.

다이 인서트와 첫 번째 보강링을 초경합금으로 한 Case 3에서 가장 작은 변형을 보인다. Fig. 9에서 보강 후 반경에 대한 변화량이 Case 3의 경우가 가장 작다. 실제 금형제작시 이와같은 내면의 변화를 연마가공에 의해 보정 후 사용하게 된다. 그러나

유한요소해석에서는 이를 보정하는 것이 어렵기 때문에 보강 전의 직경에 대한 최종 변화량을 표시하였다. Fig. 10는 성형하중이 다이 인서트에 작용하는 단조 최종단계에 대한 결과이다. 다이 인서트 내면의 변형은 Case 3에서 가장 작다. 즉, 원래 금형의 치수에 대해 가장 작은 변형을 가지는 정밀금형을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안한 정밀금형의 설계법, 첫번째 보강링의 강성을 높이는 방법으로 금형의 강성을 높여 다이 인서트의 변형을 최소화하는 방법의 타당성을 보이는 것이다.

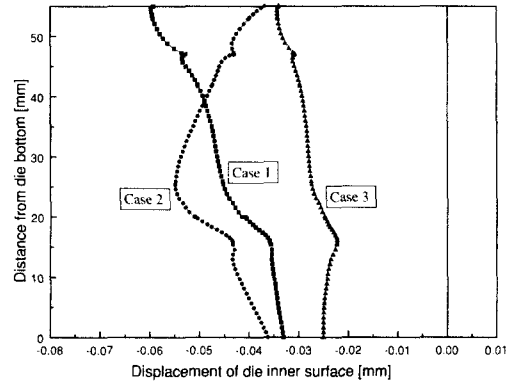
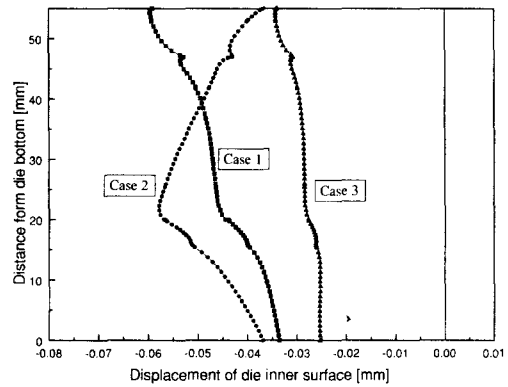
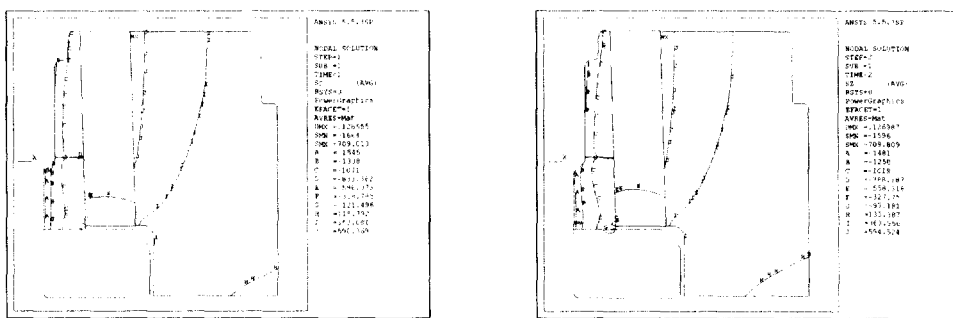
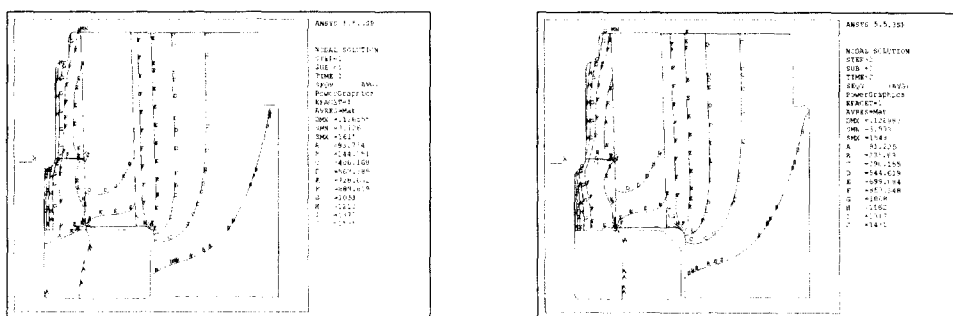


Fig. 11과 12에 Case 3의 보강 후 및 단조 최종 단계에서의 원주방향응력과 등가응력을 각각 나타내었다. 다이 인서트에서 기존 설계인 Case 1보다 등가응력이 2272MPa 보다 작은 1549MPa로 31.8%,



(a) Distribution of hoop stress after fitting (b) Distribution of hoop stress at the final stage
 Fig. 11 Distribution of hoop stress of dies at the Case 3



(a) Distribution of effective stress after fitting (b) Distribution of effective stress at the final stage
 Fig. 12 Distribution of effective stress of dies at the Case 3

원주방향응력은 -2397MPa에서 -1596MPa로 33.4% 강도 향상 효과가 있었다.

한 방법으로 정밀 냉간단조 금형의 설계가 가능함을 확인하였으며 이때, 다이 인서트에 대한 강도 향상효과가 있음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 금형의 강성을 증가시키기 위해 첫 번째 보강링을 초경합금으로 하여 정밀 냉간단조를 위한 금형설계법을 제시하였다. 그리고 분할 직경비 계산식을 구성하여 반복적인 계산에 의해 간섭량을 결정하였다.

단조 최종단계에서 초경, 초경, 금형강으로 한 경우가 원래 금형의 치수에 대해 가장 작은 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 다이 인서트에 작용하는 등가응력 및 원주방향응력이 기존설계인 초경, 금형강, 금형강으로 한 것보다 각각 31.8% 와 33.4%의 향상효과를 얻을 수 있었다.

금형의 접촉을 고려한 탄성해석을 통해 다이 인서트와 첫 번째 보강링을 초경합금으로 한 경우 원래 금형 치수에 대해 가장 작은 변형을 가져 제안

참고문헌

1. 허관도, 여흥태, 예상돈, "이중보강링으로 예압된 냉간 압출금형설계," 한국정밀공학회지, 제19권, 제10호, pp. 77-82, 2000.
2. 김형섭, "퍼스널컴퓨터를 이용한 냉간단조 공정 설계 및 금형설계의 자동화시스템에 관한 연구," 박사학위논문, 부산대학교, pp. 44-59, 1990.
3. Adler, G. und Waler, K., "Berechnung von einfachen und mechifachen prespassungen," Ind. Anz., 89, Jg, Nr, 39, Vol. 16, pp. 21-25, 1967.
4. I.C.F.G., "Calculation methods for cold forging tools," Document No. 5/82.
5. DEFORM-2D Version 7.0 Labs Manual.
6. ANSYS 5.5 Users Manual.