

비축대칭 부품의 단조금형 설계용 자동화 프로그램 개발 A Development of Automation Program for Forging Die Design of Non-Axisymmetric Parts

권순홍*, 최종웅**
Soon-Hong Kwon*, Jong-Ung Choi**

<Abstract>

This study described computer aided die design system for cold forging of non-axisymmetric parts such as gears and splines. To design the cold forging die, an integrated approach based on a rule-base system and commercial F. E. code were adopted. This system is implemented on the personal computer and its environment is a commercial CAD package named as Auto CAD. The system includes four modules. In the initial data input module, variables which are necessary to design of die are inputted by user and die material are selected from the database according to the variables. In the analysis and redesign module, stress distribution acting on the designed die is analyzed by commercial FEM code NISA II with elastic mode. If die failure predicted, the designed die would modified in four ways to prevent die failure in both states of stress free and pressurizing. The developed system provides useful data and powerful capabilities for die design of non-axisymmetric parts.

**Key Words : Non-Axisymmetric Three-Dimensional Parts,
Stress Concentration, Computer Aided Die Design**

1. 서론

단조에 사용되는 금형은 가혹한 작업조건하에서 사용되므로 금형의 손상이 심하여 수명이 매우 짧으며, 이러한 수명의 저하는 금형 비용의 증가에 그치지 않고 가동률의 저하 및 품질 관리 비용의 증가 등에 연관되어 부품 비용의

상승 원인이 되므로 구조, 재질, 강도 등을 고려하여 종합적으로 설계하여야 한다. 특히, 단조품의 정밀도는 금형의 정밀도에 지배적인 영향을 받으므로 정밀부품을 제작하기 위해서는 금형설계시 금형의 탄성팽창, 제품의 탄성회복 등을 고려하여야 한다.^(5~8) 산업 현장에서의 금형설계는 과거의 축적된 기술과 경험에 크게

* 정회원, 밀양대학교 기계공학과 교수, 工博

E-mail : kwonsh@arang.miryang.ac.kr

** 정회원, 부산대학교 대학원 기계공학과 박사과정

* The Dept. of Mechanical Engineering, Miryang National University

** The Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University Graduate School

의존하여 왔으나, 최근에는 최적의 설계변수 및 금형변수 등을 결정하기 위하여 컴퓨터를 이용한 자동화 시스템을 적용하는 것이 필수적이다.

컴퓨터를 이용한 금형설계 시스템의 개발에는 Choi⁽³⁾ 등이 GWBASIC언어를 사용하여 축대칭 단조품의 금형설계에 있어 경험이 없는 설계자라도 대화식으로 설계할 수 있는 자동화 시스템을 개발하였다. 그러나 이 시스템은 형상표현의 한계로 인하여 설계대상이 제한되어 있고 출력된 금형 도면의 수정이나 재설계를 할 수 없는 불편함이 있었다.

비축대칭 형상의 단조에 관한 금형설계에 있어 Cho⁽²⁾는 헬리컬 기어의 압출에 대하여 전극의 과방전량과 압출기어의 후가공을 고려한 금형을 설계하고 합금강을 소재로 하여 유한요소 해석과 실험을 행하였다. Choi⁽⁴⁾ 등은 기어류 부품의 단조에 있어 상계법을 이용하여 금형에 작용하는 하중을 구하고 이를 바탕으로 보강링을 사용한 금형을 설계하고 실험하였으나 이것은 모델 재료인 알루미늄에 적용 가능한 것이었고 실제 재료인 합금강에 대하여 적용할 수 없었다. 이상에서와 같이 금형설계의 자동화는 CAM을 위하여 주로 CAD 프로그램 상에서 구현하고 있으며, 지금까지 개발된 시스템들은 압출, 2차원 축대칭 부품의 단조 및 알루미늄과 같은 모델재료에만 적용이 가능한 것이었다.

따라서, 본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 비축대칭 냉간단조품의 금형설계 프로그램을 개발하여 금형설계와 도면출력을 자동화하고 금형설계에 경험이 없는 초보자라도 숙련자와 같이 금형을 설계할 수 있는 금형설계 시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 여러 문헌에서 제시된 2차원 축대칭 금형설계규칙과 경험식을 사용하여 축대칭형상에 대한 금형을 먼저 설계한다. 설계된 금형을 이용하여 비축대칭 형상에서 발생하는 응력집중을 고려하기 위해 유한요소 해석을 한다. 유한요소 해석을 통하여 금형의 안정도를 평가하고 설계된 금형이 단조중 파손되지 않도록 여러 가지 금형 변수를 수정하여 비축대칭 부품의 단조에 적용 가능한 금형설계 프로그램을 개발하고자 하였다. 또한, 개발된 프로그램을 일반적인 비축대칭 부품인 인벌류우트 스피어 기어의 단조 금형설계에 적용하여

금형을 설계하고자 하였다.

2. 설계 규칙베이스

본 연구에서 개발된 냉간단조품의 금형설계 시스템의 규칙베이스는 전문기술지식을 소성역학이론, 각종 핸드북, 관련문헌 및 생산현장 전문가의 경험적 지식에서 추출하여 일반적이고 이론적으로 모순이 없는 사항에 대하여 규칙베이스로 구축하였다.

본 금형설계에 구축된 시스템은 결정트리에 기초한 "IF [conditions] THEN[actions]" 형태의 생성규칙을 이용하였다. 조건부의 정보에 따라서 결과부의 정보를 계산하고 결과부의 출력 정보는 다음 조건부의 입력정보가 된다. 여기에 제시된 규칙베이스는 경험적인 설계지침들과 노하우(know-how)를 체계화하여 정량화 하였다.

- 규칙 1) 금형 세트 총 외경은 프레스의 제원에 따라 결정된다.
- 규칙 2) 인서트와 보강링의 항복조건은 Tresca 항복조건을 적용한다.
- 규칙 3) 인서트와 보강링의 설계는 최대허용내압이 발생할 수 있도록 직경을 분할한다.

최대허용 내압 계산식은 다음과 같다

$$P_{i\text{opt}} = S_{y1} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{1}{K_1} \right] - Q \cdot \sqrt{\frac{1}{K_1}} \right)$$

- 규칙 4) 최대허용내압이 작용할 때는 인서트강링이 동시에 항복되도록 끼워맞춤공차를 준다.

끼워맞춤공차 계산식은 다음과 같다.

$$Z_1 = \left[\frac{1}{E_2} \frac{1 + Q_{2\text{opt}}^2}{1 - Q_{2\text{opt}}^2} + \frac{1}{E_1} \frac{1 + Q_{1\text{opt}}^2}{1 - Q_{1\text{opt}}^2} \right] \cdot P_1 \cdot d_1$$

- 규칙 5) 인서트와 보강링의 설계에서 다이내압 P_d 와 최적 분할비를 사용할 때의 $P_{i\text{opt}}$ 및 끼

위 맞춤에 의한 인서트의 항복방지를 위한 한계내압 P_{ilimit} 의 관계는 $P_d \leq P_{iopt} \leq P_{ilimit}$ 이다.

한계내압 계산식은 다음과 같다.

$$P_{ilimit} = S_{y1} \cdot (1 - Q^2) \begin{cases} Q=0 \\ \frac{P_{iopt}}{S_{y1}} = 1 \end{cases}$$

3. 프로그램의 구성

일반적인 기계장치와 마찬가지로 금형설계에서도 설계기간 단축 및 품질향상을 위해 컴퓨터를 이용한 설계 및 제작기술 개발이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 앞서 논의한 방법론에 근거해 Fig. 1과 같이 전체시스템을 구성하고 컴퓨터를 이용하여 금형을 설계하기 위한 통합설계 시스템을 구축하고자 하였다. 시스템의 구성은 초기치 입력 모듈, 금형설계 모듈, 금형 해석 및 수정 모듈 및 이들 모듈간의 관리 및 통제를 위한 관리모듈 등의 4개 모듈로 이루어져 있다.

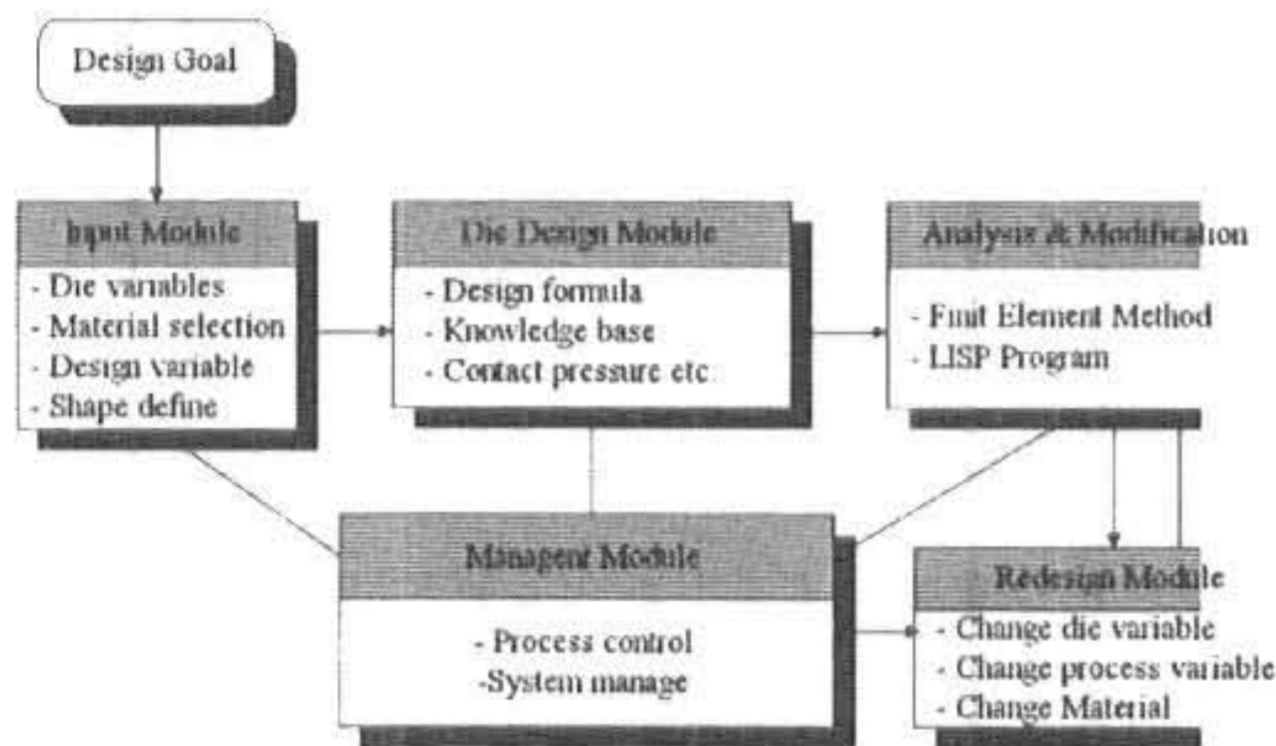


Fig. 1 Structural diagram of the developed system

본 시스템은 금형 해석 및 수정 모듈에서 금형을 해석하기 위한 유한요소해석을 제외한 모든 모듈은 하나의 환경에서 수행되며, 각 모듈 사이에서 시스템을 중단하지 않고서도 모든 과정을 수행할 수 있다. 금형에 대한 유한요소해석은 AutoCAD환경에서 작동하는 AutoLISP언어로 작성된 시스템에 의해 자동 설계된 금형을 유한요소 상용 프로그램인 NISA II를 이용하여 탄성 시뮬레이션하여 금형에 작용하는 응

력분포 및 응력집중부위를 예측할 수 있다. 본 시스템과 NISA II와의 인터페이스는 IGES파일을 통해서 이루어진다.

3.1 관리모듈

일반적으로 금형은 그 용도 및 사용조건에 따라 강도적 신뢰성, 요구수명 등이 만족되도록 설계된다. 이러한 설계과정에서 여러 가지 다양한 설계지식이 존재하고 이들 각각의 모듈은 상호간에 긴밀한 협조를 통해서 설계를 진행해가야 한다.

3.2 초기치 입력모듈

초기치 입력모듈은 금형설계의 초기 값을 입력하는 모듈로서 다이 변수 입력부분, 금형의 재질 선택부분, 설계변수 입력부분 및 단조품 형상 입력부분으로 구성되어 있다. 금형설계에 필요한 다이 변수들은 금형의 총외경 및 두께, 보강링의 개수 등이 있다. 단조품 형상입력부분에서 기어단조 금형의 경우 이수, 모듈, 압력각 등의 변수가 있으며 이 값들은 사용자가 정의해 주어야 한다.

3.3 금형설계 모듈

금형설계 모듈은 금형 재질에 대한 데이터 베이스를 이용하여 주어진 입력사항을 기초로 하여 실제 제작에 필요한 금형 변수, 즉 최적 분할직경, 한계내압, 접촉면압, 끼워맞춤공차 등이 계산된다. 실제 본 시스템으로 설계할 때 본 모듈에서 설계된 결과는 설계자에게 화면으로 보여지고 이를 받아들여지게 되면 해석 및 수정모듈의 입력조건으로 넘겨진다.

3.4 금형 해석 및 수정모듈

금형 해석 및 수정모듈은 금형설계 모듈에서 설계된 금형에 대하여 유한요소법을 이용한 응력해석 및 이를 기초로 금형의 수명향상을 위해 금형 수정을 할 수 있는 모듈이다. 이때 유한요소해석을 위해 설계된 금형에 부과되는 경계조건은 인서트와 보강링, 보강링과 보강링 사이의 끼워 맞춤 공차에 의해 발생하는 접촉면압과 최종성형단계에서 다이에 작용하는 성형압력 등이다. 이때 입력 값인 접촉면압과 단조

최종상태에서 금형에 작용하는 내압은 각각 LISP 프로그램에서 제시된 속도장을 이용하여 상계법으로 구한 값을 사용한다.

외치형 기어류 부품을 내면에 치형이 가공된 금형을 사용하여 단조할 경우 이뿌리부에 응력 집중으로 인한 과도한 응력이 발생하여 금형이 파손될 수 있다. 금형 파손이 예측될 경우 본 시스템에서 제시한 방법을 사용하여 응력의 크기를 감소시키기 위해 금형을 수정하여 재설계한다. 금형 수정의 첫번째 방법은 금형 세트의 총 외경을 증가시키는 방법이다. 두번째 방법은 금형 세트의 총 외경이 결정되더라도 보강링의 개수를 늘임으로써 금형 세트의 최대 허용내압을 증가시키는 방법이다. 하지만 이 방법은 다이를 가공할 때 더 많은 비용과 시간이 걸리는 단점이 있다. 세번째 방법은 금형설계 모듈에서 계산된 공차량을 조절함으로써 금형 세트에 작용하는 응력을 조절하여 궁극적으로 금형의 이뿌리부에 작용하는 응력집중의 크기를 감소시키는 방법이다.

4. 시스템 적용 결과 및 고찰

4.1 초기치 입력모듈

Table 1. Specifications of gear and design variables

| Involute spur gear | | | Dieset | | | |
|--------------------|--------|----------------|----------|--------------|--------------|---------|
| No. of teeth | Module | Pressure angle | Diameter | Material | | Height |
| | | | | Insert | Stress ring | |
| 10 | 2.0 | 20° | 225.0 mm | STD11, HRC62 | STD61, HRC50 | 30.0 mm |

제시한 금형설계 규칙을 기초로 하여 일반적인 비축대칭 부품중의 하나인 인벌류우트 스퍼어기어의 단조 금형을 설계한다. 먼저, 제시된 규칙들을 사용하여 축대칭 형상에 대하여 일반적인 금형설계를 한 후 금형 해석 및 수정모듈을 거쳐 비축대칭 형상인 기어의 금형을 설계한다. 보강링의 개수는 1개이며 다이 및 펀치의 재질을 선택한다. 금형의 재질은 공구강이며 보강링을 압입 하는 방법은 열박음이다. 설계대상으로 하는 외치형 기어류 부품은 이수가 10, 모

듈 2.0, 압력각 20° 인 표준 인벌류우트 스퍼어 기어이다. Table 1에 초기치 입력모듈에서 사용자에게 의해 결정되는 입력 값들을 나타내었다.

4.2 금형설계 모듈

다이의 내경을 설계하고자 하는 기어의 치끝원 직경으로 하여 기어류 부품의 단조용 금형을 설계하기 위해 먼저 축대칭 원형 내면을 갖는 금형에 대한 설계 규칙을 이용하여 축대칭 부품의 단조 금형을 설계한다. Table 1에서 주어진 입력조건에 따라 계산된 금형 변수는 Table 2와 같이 계산되어 화면상에 나타내어지며, Fig. 2는 이를 근거로 설계된 금형이다.

Table 2. Calculated results of die variables

| Variables | Values |
|--|-------------------------------|
| Optimum division diameter | 81.3242 [mm] |
| Contact pressure | 453.638 [N/mm ²] |
| Theoretical interference fit tolerance | 0.4365 [mm] |

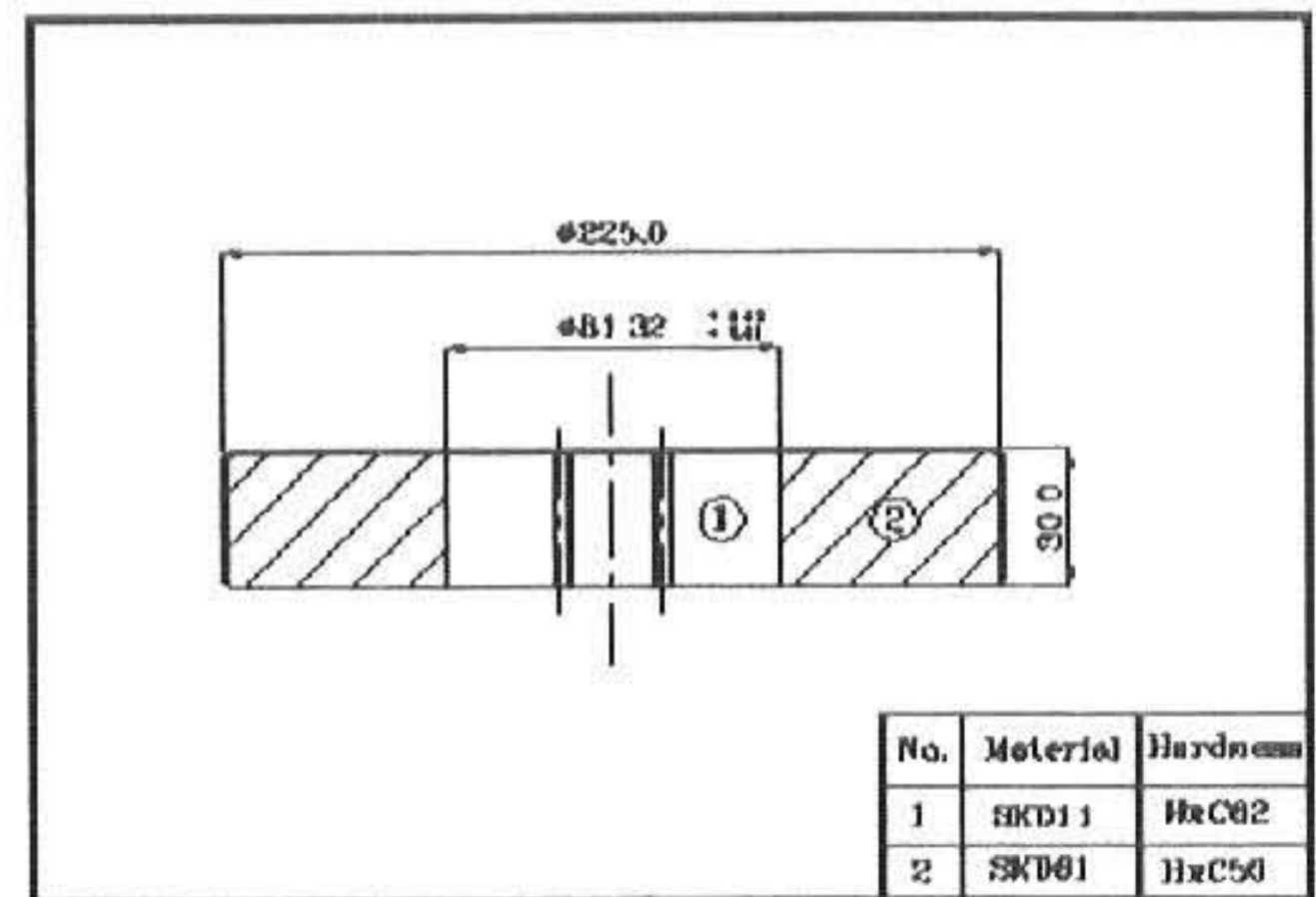
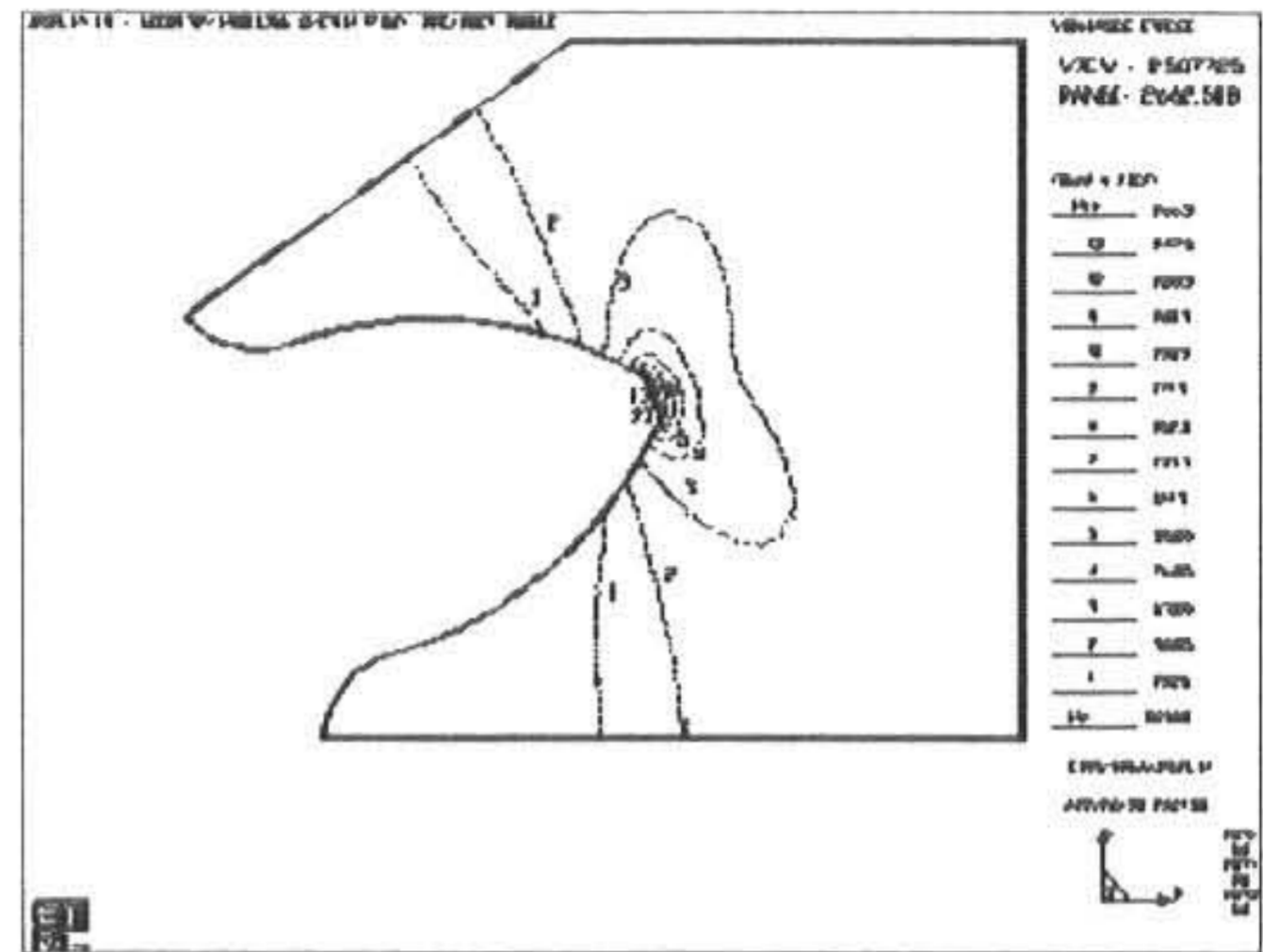


Fig. 2 Schematic drawing of designed die with inputted die variables

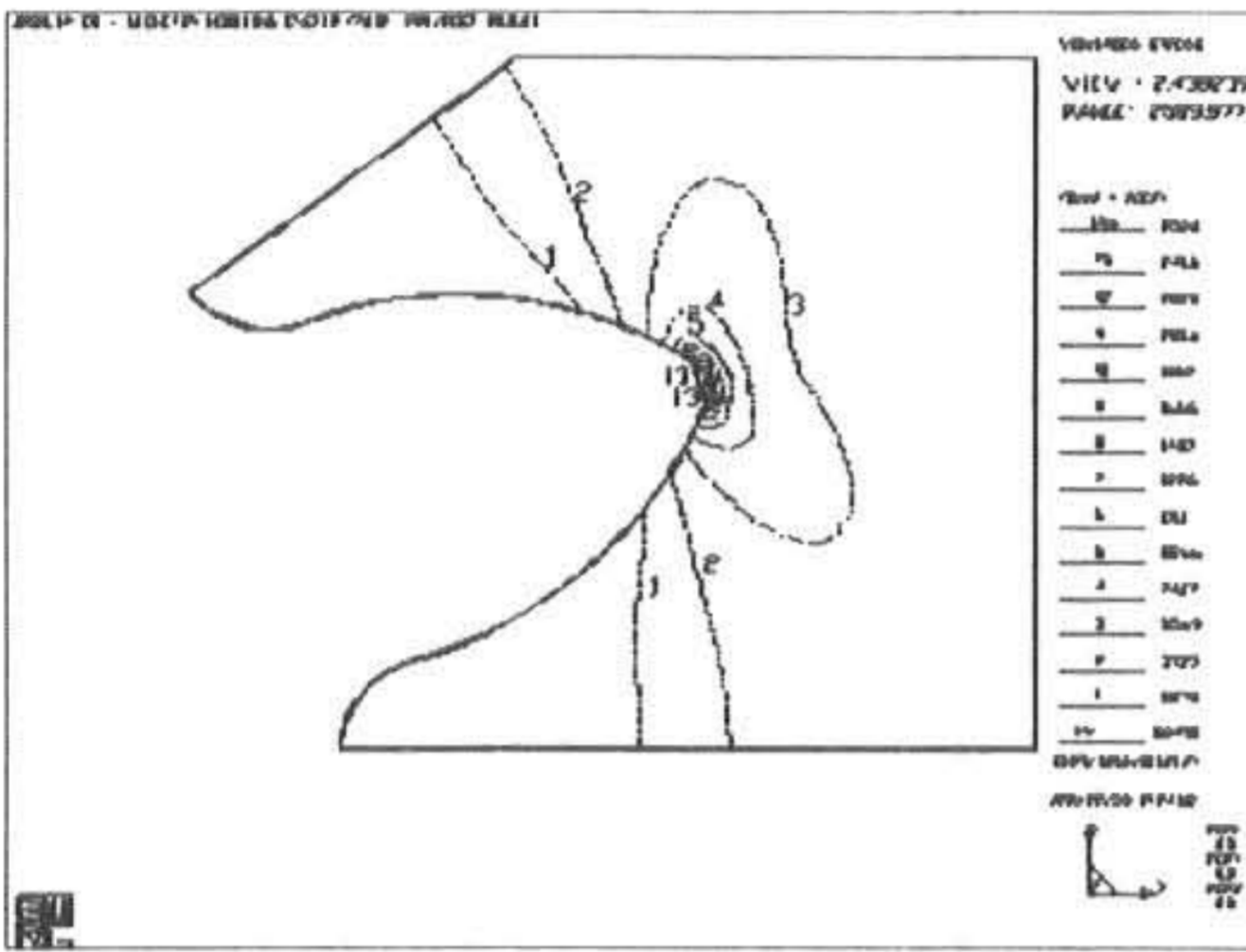
4.3 금형 해석 및 수정모듈

금형설계 모듈에서 설계된 축대칭 단조 금형의 결과를 기초로 하여 인벌류우트 치형의 기어단조 금형에 작용하는 응력분포를 유한요소

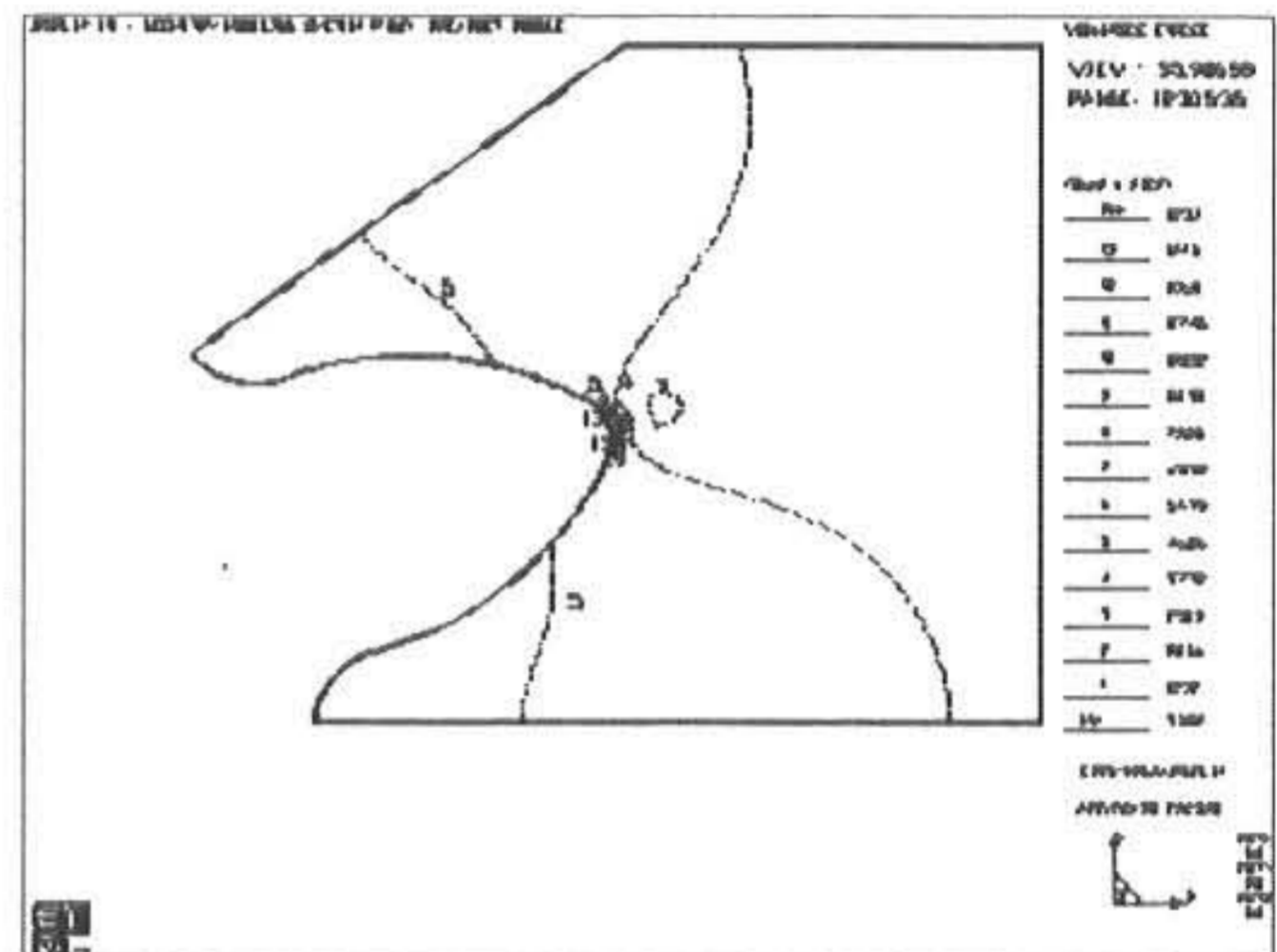
해석하면 Fig. 3과 같다. 내압이 작용할 경우 이뿌리에서의 응력집중으로 인한 최대응력의 크기는 인서트의 항복강도를 초과하지 않지만, 내압이 없는 경우는 접촉면압에 의해 항복강도를 초과하는 응력이 발생함을 볼 수 있다. 이와 같이 이뿌리에서 응력집중으로 인한 최대응력이 금형 재료의 항복강도를 초과하여 금형의 변형이나 파손의 우려가 있는 경우 금형의 수명향상을 위하여 본 연구에서 제시한 금형 수정 방법을 사용하여 최대응력의 크기를 감소시킬 수 있도록 이미 설계된 금형을 수정하게 된다.



(a) without inner pressure

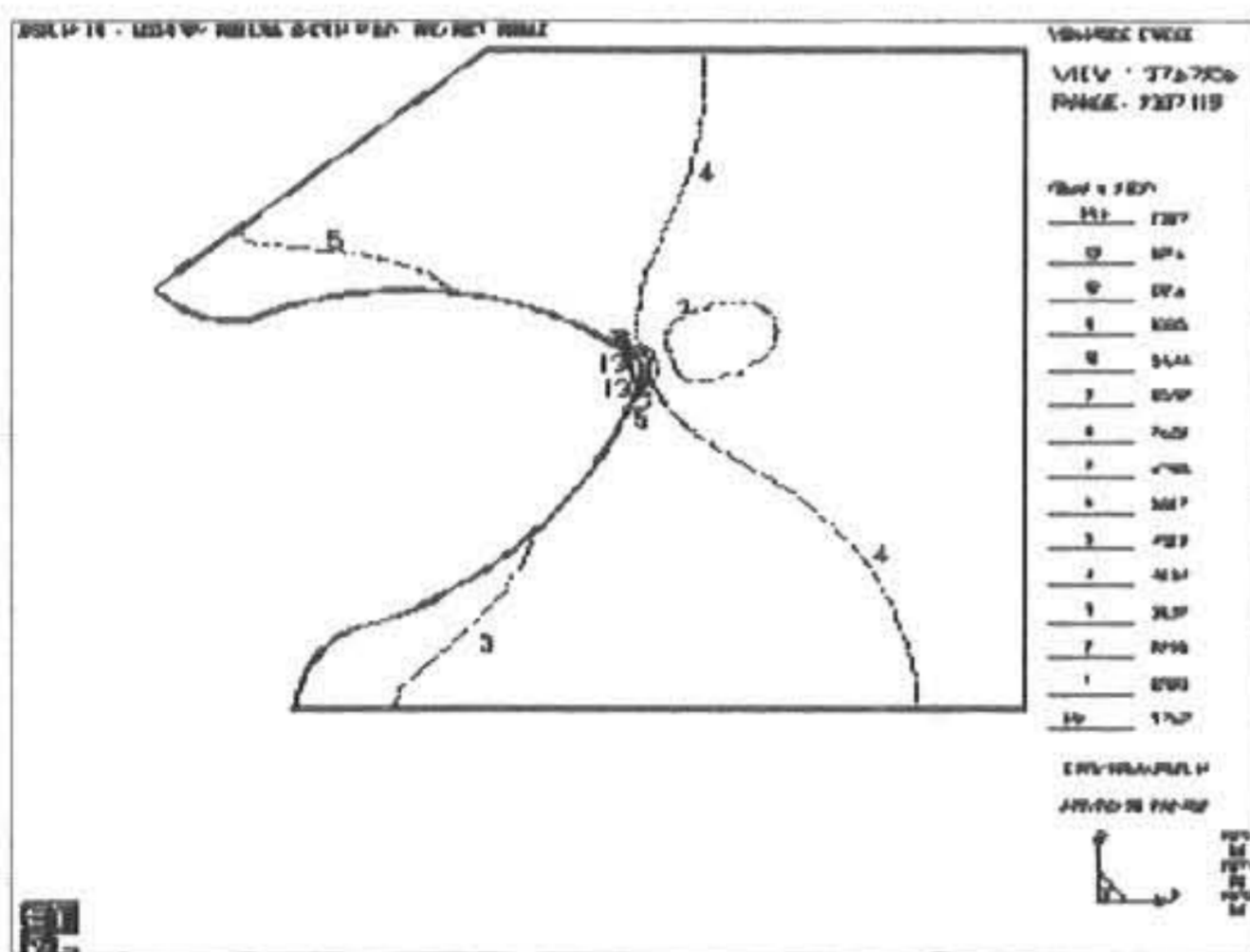


(a) without inner pressure



(b) with inner pressure

Fig. 4 Stress distribution on the modified die (Do = 250.0 mm)



(b) with inner pressure

Fig. 3 Stress distribution on the designed die

금형 수정의 첫 번째 방법은 금형 세트의 총 외경을 변화시키는 것이다. Fig. 4는 225.0 mm 인 금형 세트의 외경을 250.0 mm로 증가시킨 경우에 있어 내압이 작용할 때와 작용하지 않을 때에 대한 응력분포를 나타낸 것으로, 내압이 작용할 때는 금형 세트의 외경이 증가함에 따라 끼워맞춤공차량이 증가하여 인서트에 작용하는 접촉면압이 커져서 단조 가공중 인서트에 발생하는 인장응력을 더 많이 감소시킬 수 있으므로 단조 최종상태에서 전체 금형에 작용하는 응력분포 및 이뿌리에서 최대응력의 크기가 감소함을 볼 수 있다. 반면, 내압이 작용하지 않는 상태에서는 접촉면압의 증가로 인하여 이뿌리에서 응력의 크기가 증가하여 금형 파손

에 대한 우려가 더 커짐을 알 수 있다. 따라서, 금형의 전체 외경을 증가시키는 것은 내압이 작용하지 않는 상태에서 최대응력의 크기를 증가시켜 금형의 안정도를 감소시키며, 금형 세트의 외경은 프레스의 제원에 따라 이미 결정되어 있으므로 금형수정 방법으로는 적절하지 못하다.

금형 수정의 두 번째 방법은 보강링의 개수를 변화시키는 방법이다. 금형 세트의 외경을 고정하고 보강링의 개수를 1개에서 2개로 변화시킨 경우에 있어 금형 전체에 발생하는 응력분포를 유한요소 해석하였다. 보강링이 두 개인 경우에 있어 Table 3과 같은 입력조건에 대하여 본 연구에서 제시한 금형설계 시스템으로써 금형 변수를 계산하면 Table 4와 같다.

Table 3. Design variables for two stress rings

| Diameter | Die material | | | Height |
|----------|---------------|-----------------|-----------------|---------|
| | Insert | 1st stress ring | 2nd stress ring | |
| 225.0 mm | STD11, HRC 62 | STD61, HRC 50 | SCM4, HRC 35 | 30.0 mm |

Table 4. Calculated results of die variables for two stress rings

| Variables | Values |
|--|---------------------------------------|
| Optimum division diameter | 61.5908, 129.055 [mm] |
| Contact pressure | 572.195, 169.14 [N/mm ²] |
| Theoretical interference fit tolerance | 0.42216, 0.3756 [mm] |

계산된 설계변수를 이용하여 두 개의 보강링을 갖는 Fig. 5과 같은 금형을 설계하였다. 접촉면압과 최종상태의 단조압력을 경계조건으로 하여 금형에 단조 최종상태의 압력이 작용할 때와 작용하지 않을 때에 대하여 유한요소해석을 수행한 경우의 한 개의 치형에 대한 응력분포를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는바와 같이 내압이 작용하는 경우에 대하여 이뿌리에 작용하는 응력의 크기가 보강링이 1개인 경우보다 상당히 감소함을 볼 수 있으나 이것 역시 내압이 작용하지 않는 상태에서는 이뿌리에서

응력집중으로 인한 파손이 예측되어 금형 개선의 의미가 없다고 생각된다. 또한, 보강링의 개수를 증가시키는 것은 가공시간 및 비용의 증가로 제품원가 상승의 원인이 될 수 있어 바람직하지 않다.

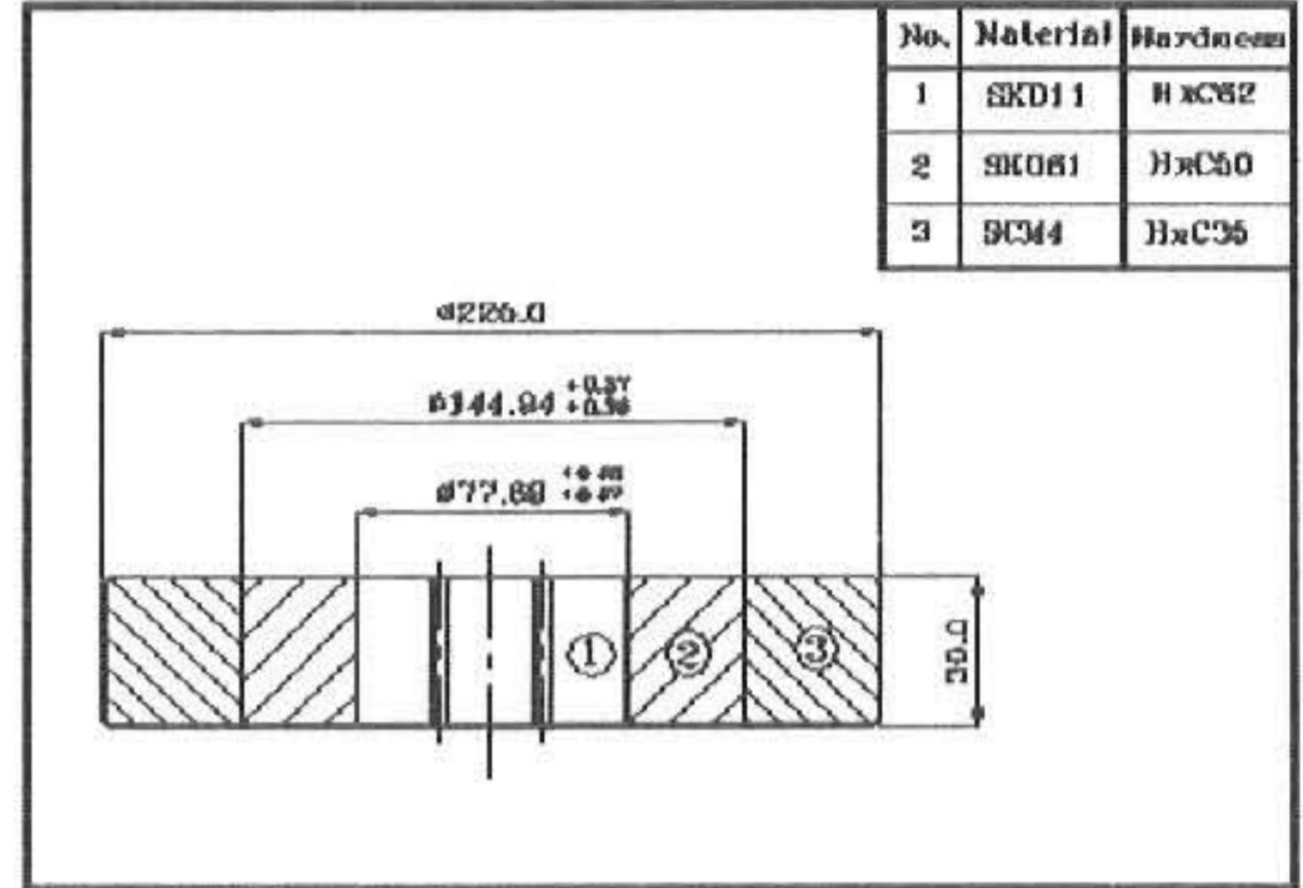
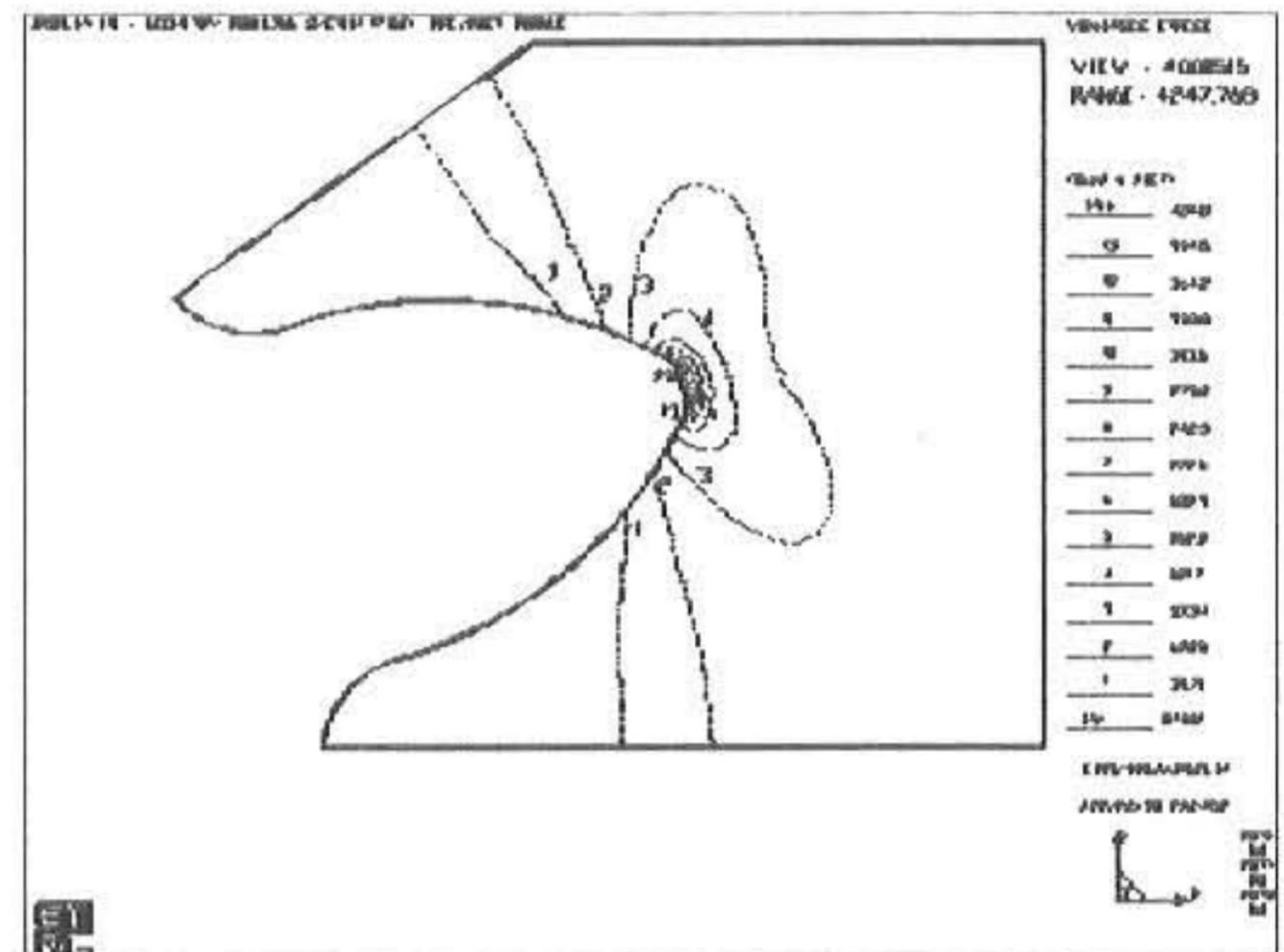
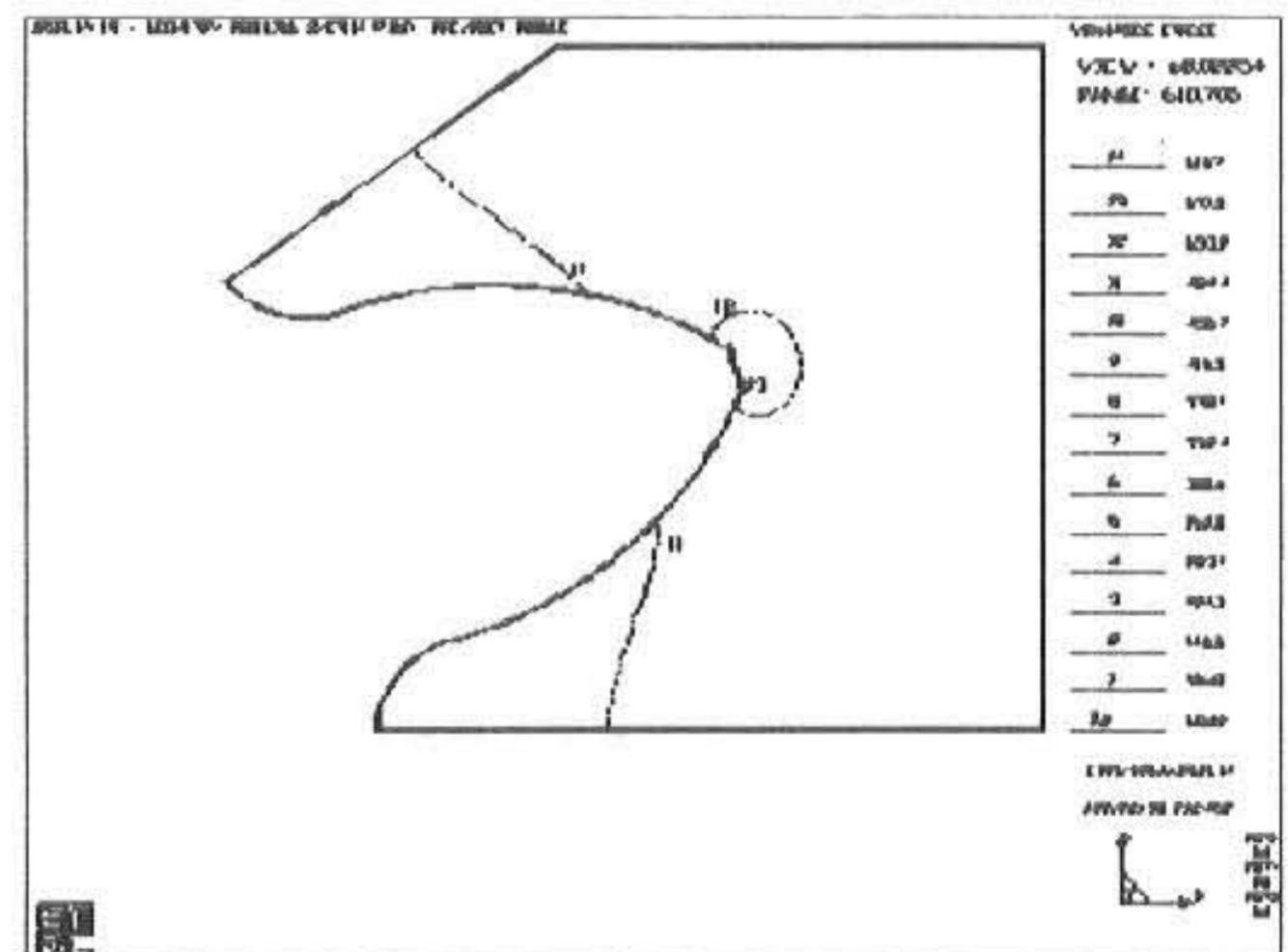


Fig. 5 Schematic drawing of two stress



(a) without inner pressure



(b) with inner pressure

Fig. 6 Stress distribution on the die with two stress rings

Table 5. Calculated results of die variables for stress ring material STD11

| Variables | Values |
|--|-------------------------------|
| Optimum division diameter | 81.118 [mm] |
| Contact pressure | 576.368 [N/mm ²] |
| Theoretical interference fit tolerance | 0.5438 [mm] |

Table 6. Calculated results of die variables for stress ring material SCM4

| Variables | Values |
|--|-------------------------------|
| Optimum division diameter | 94.3904 [mm] |
| Contact pressure | 289.081 [N/mm ²] |
| Theoretical interference fit tolerance | 0.3321 [mm] |

인서트의 재질을 일반적인 공구강보다 압축강도가 높은 고속도 공구강인 SKH9로 하고 보강링의 재질을 각각 STD11과 SCM4로 하였을 경우 계산된 설계변수는 각각 Table 5 및 Table 6과 같으며, 계산된 변수로써 Fig. 7 및 Fig. 8과 같은 금형을 설계하였다. 인서트의 재질이 같을 경우 두 가지 보강링 재질에 대하여 내압이 작용할 때와 하지 않을 때에 대한 응력 분포를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서와 같이 내압이 작용하지 않는 경우 보강링의 강도가 높을수록 금형에 작용하는 접촉면압의 크기가 증가하여 이뿌리의 최대응력의 크기가 증가함을 볼 수 있으며, 내압이 작용하는 경우에는 보강링의 강도가 높을수록 접촉면압이 증가하여 단조중 발생하는 인장응력을 더 많이 상쇄시키므로 금형의 안정도가 향상된다.

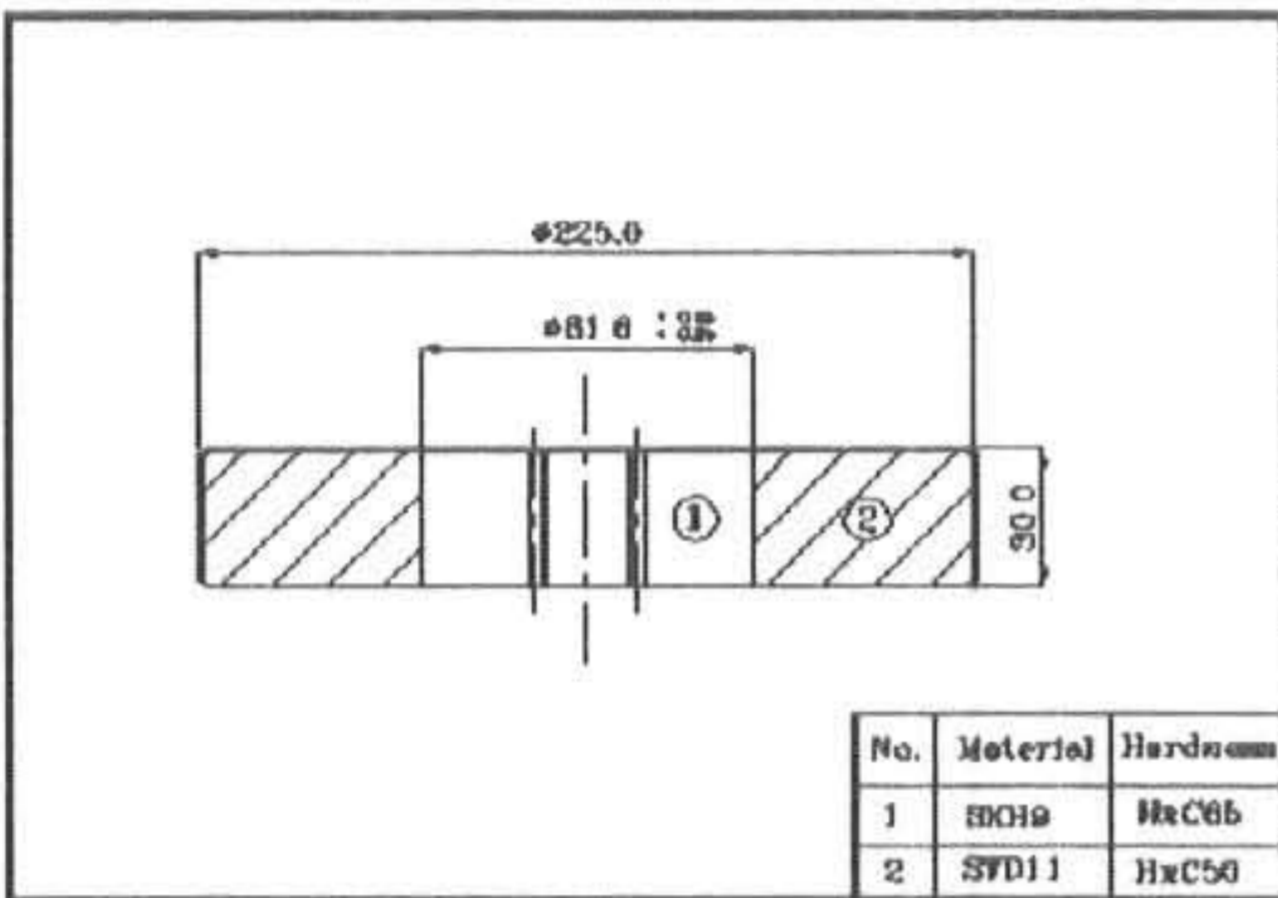


Fig. 7 Schematic drawing of designed die with modified die materials (insert : SKH9, stress ring : STD11)

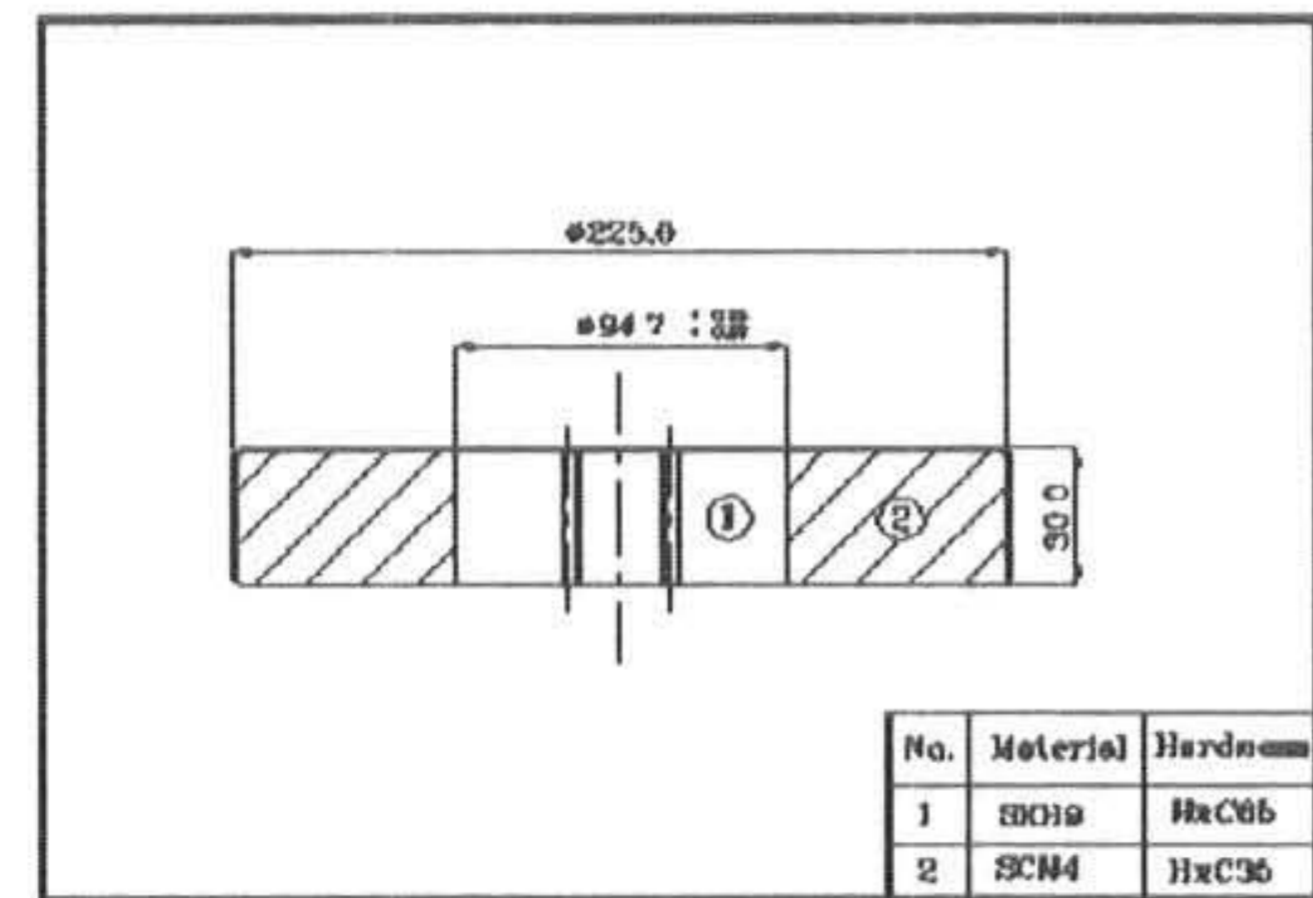
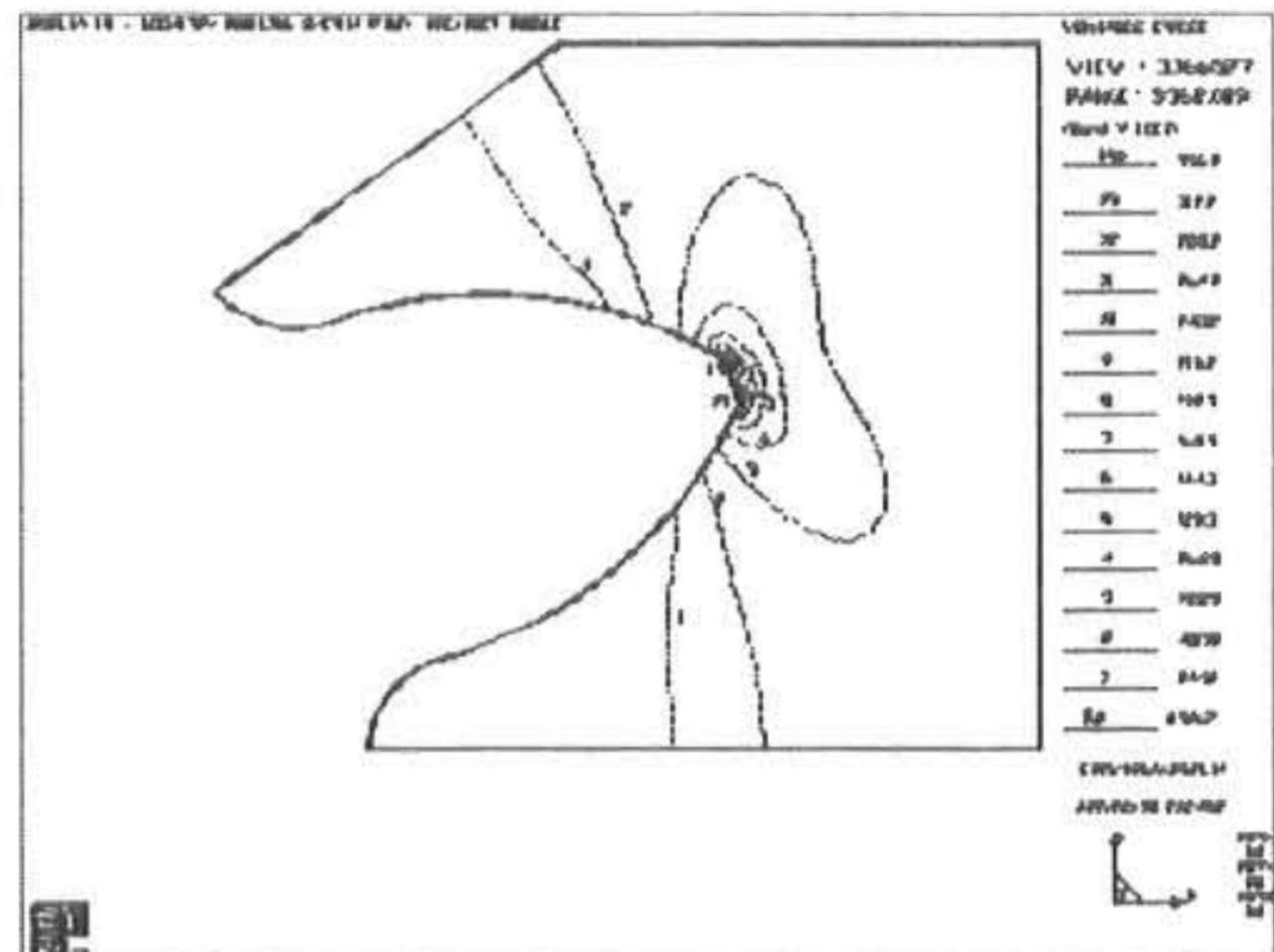
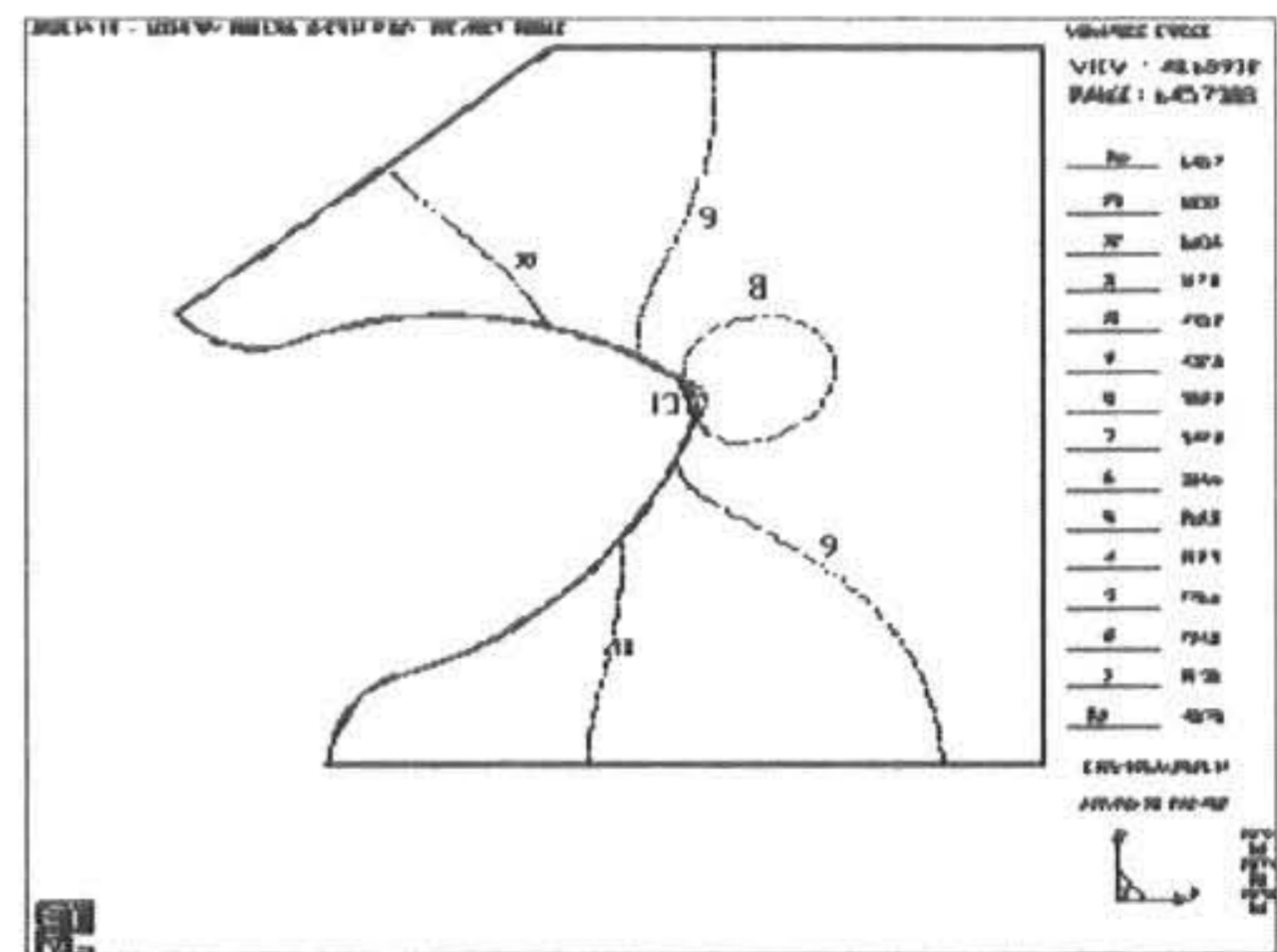


Fig. 8 Schematic drawing of designed die with modified die materials (insert : SKH9, stress ring : SCM4)

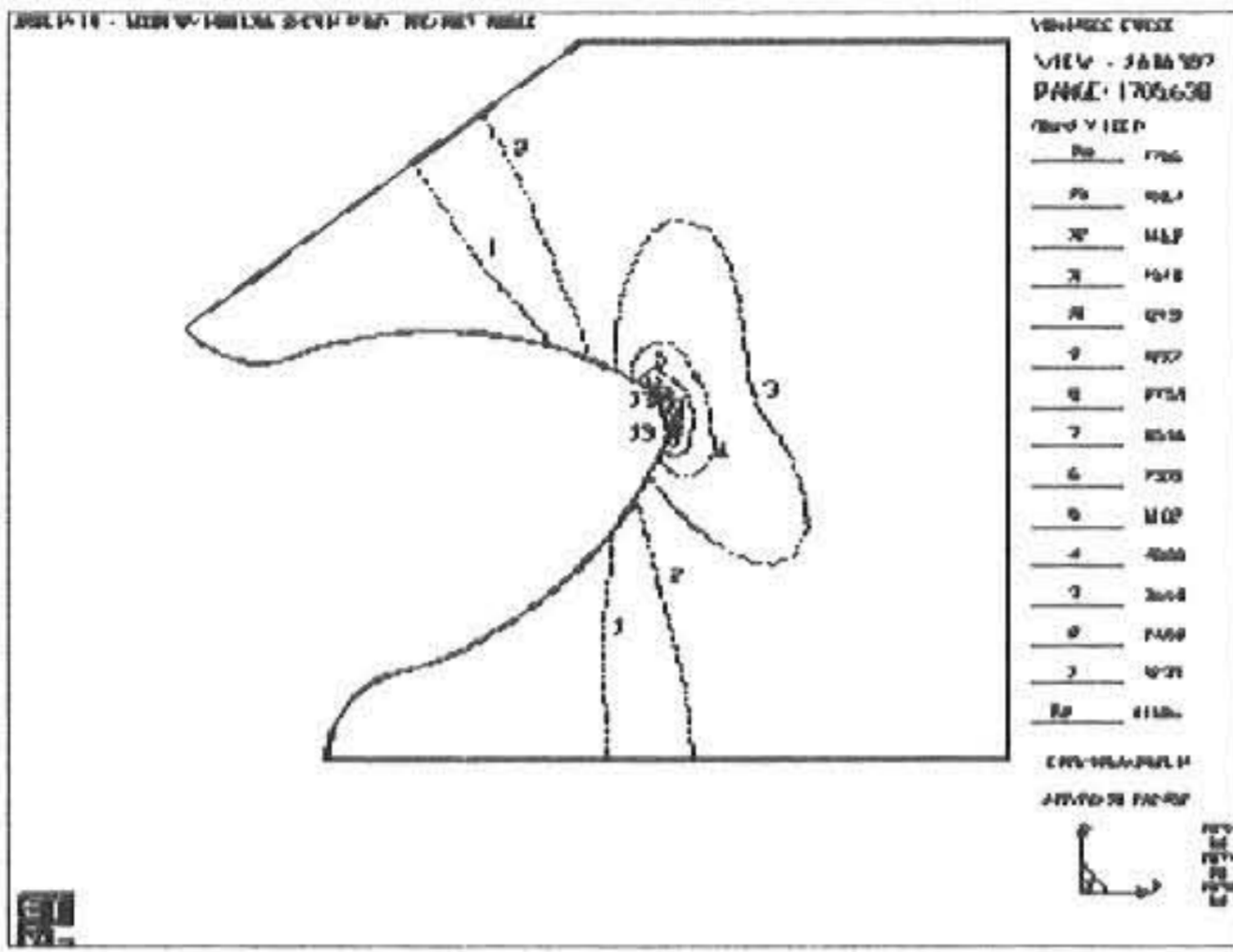


(a) without inner pressure

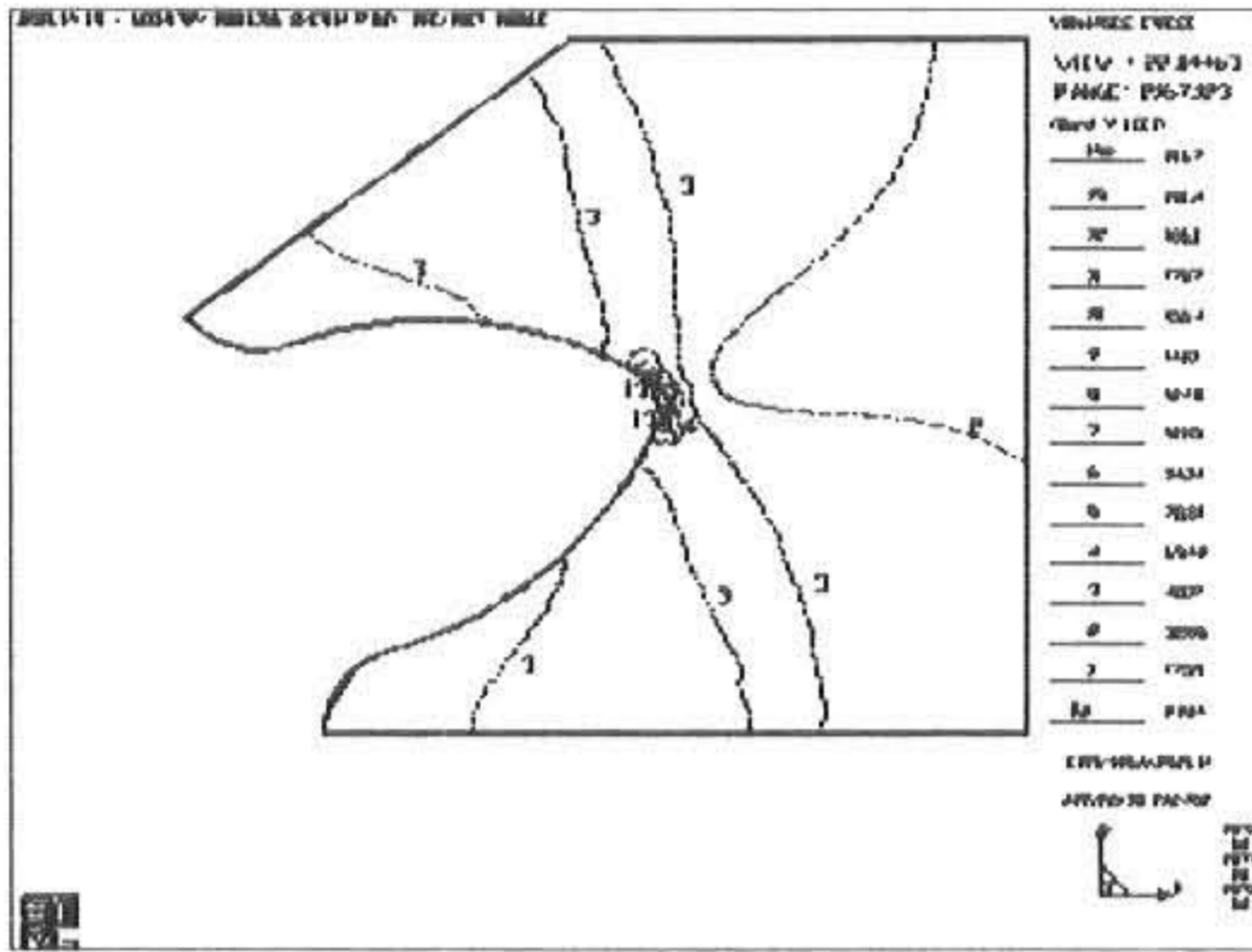


(b) with inner pressure

Fig. 9 Stress distribution on the die with modified die materials (insert : SKH9, stress ring : STD11)



(a) without inner pressure



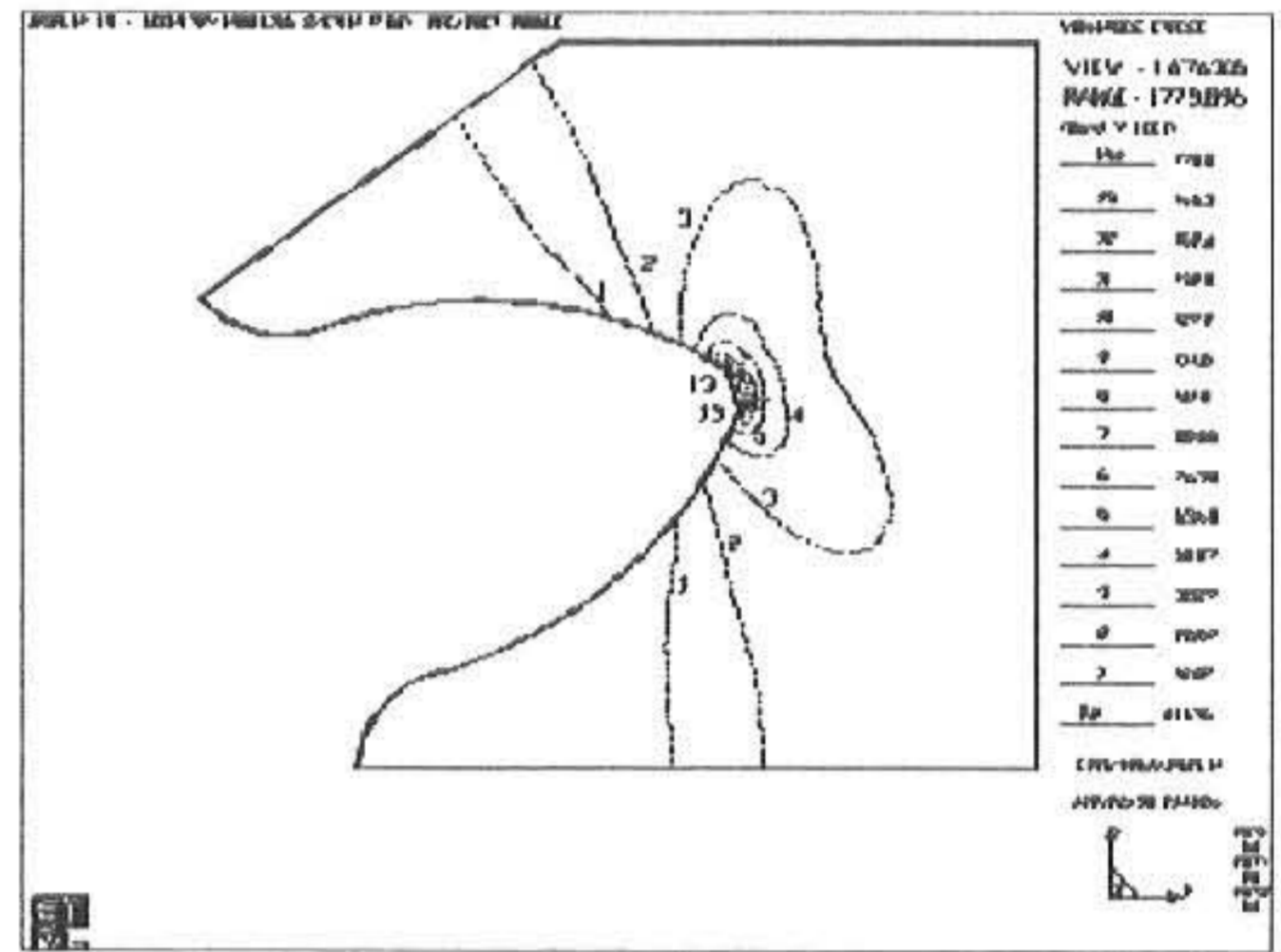
(b) with inner pressure

축공차량을 0.3, 0.2로 하였을 경우에 대하여 금형에 작용하는 응력을 해석한 것이다. 그림에서와 같이 끼워맞춤공차량의 감소로 인한 접촉면압이 감소할수록 내압이 작용하지 않는 상태에서 이뿌리부에 작용하는 최대응력이 감소함을 볼 수 있으며, 끼워맞춤공차량이 0.3이하인 경우에서 내압이 작용하지 않을 때 최대응력이 인서트의 항복강도를 초과하지 않게 된다. 결국, 접촉면압의 크기를 적절히 조절함으로써 비축대칭부품의 단조에 적용 가능한 금형을 설계할 수 있다.

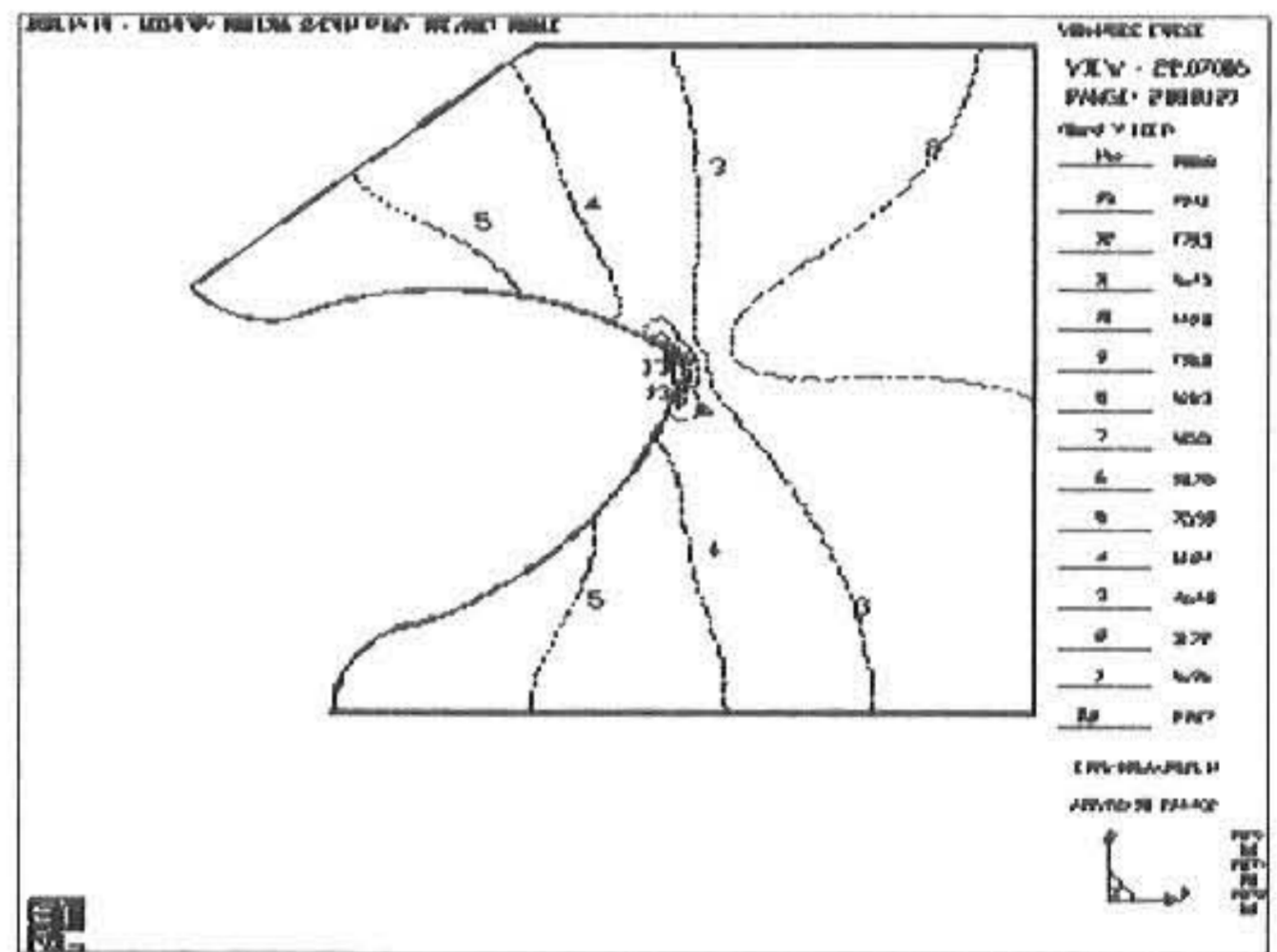
Fig. 10 Stress distribution on the die with modified die materials (insert : SKH9, stress ring : SCM4)

보강링 재질이 SCM4인 금형의 경우 내압의 유무에 관계없이 인서트의 항복강도 보다 작은 응력이 이뿌리에 작용하므로 실제 단조에 사용 가능한 금형이라 생각되며 이를 이용한 축대칭 부품의 단조에 적용 가능한 금형을 설계할 수 있다. 금형 수정의 세 번째 방법은 인서트와 보강링 사이 또는 보강링과 보강링의 사이에 발생하는 접촉면압의 크기를 변화시키는 방법이다. 보강링의 강도가 커서 내압이 작용하지 않는 상태에서 금형 파손이 예측될 경우 인서트와 보강링 사이의 끼워 맞춤 공차를 작게 하여 접촉면압의 크기를 낮춤으로써 내압이 작용하지 않는 상태에서도 파손되지 않는 금형을 설계할 수 있다.

Fig. 11, Fig. 12는 Table 2에 나타난 끼워맞



(a) without inner pressure



(b) with inner pressure

Fig. 11 Stress distribution on the die with modified fit tolerance(z=0.3)

5. 결론

본 연구에서는 2차원 축대칭 금형설계 규칙을

이용하여 금형을 설계한 후 유한요소 프로그램으로써 응력집중을 예측하여 금형을 재설계함으로써 최적 분할직경, 최대 허용내압, 한계내압, 끼워 맞춤 공차 및 응력분포 등의 금형 변수를 자동으로 계산하는 금형설계 프로그램을 개발하여 비축대칭 부품의 단조에 적용 가능한 금형설계 자동화 시스템을 완성하였다. 이를 인벌류우트 스피어 기어의 단조 금형에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인벌류우트 스피어기어의 단조의 경우 대칭면에 접하는 이뿌리원에서 응력집중이 발생한다.
2. 보강링의 재질이 SCM4인 경우 내압의 유무에 관계없이 인서트의 항복강도 보다 작은 응력이 이뿌리부에 작용하므로 실제 단조에 사용 가능한 금형이라 생각된다.
3. 접촉면압의 크기를 적절히 조절함으로써 비축대칭 부품의 단조에 적용 가능한 금형을 설계할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 민규식, 최종웅, 조해용, 이현철 : 기어류 부품의 단조에 관한 상계해석, 한국정밀공학회지 14(2), pp102-112, (1997)
- 2) 조해용 : 헬리컬기어의 냉간 압출에 관한 연구, 부산대학교, 박사학위 논문, (1991)
- 3) 최재찬, 김병민, 진인태, 김형섭 : 퍼스널 컴퓨터에 의한 냉간 단조공정 및 금형설계의 자동화에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 12(4), pp712-720, (1988)
- 4) 최재찬, 조해용, 최종웅, 민규식 : 내부에 세레이션홀이 존재하는 부품의 단조에 관한 연구, 한국정밀공학회지14(6), pp142-148,(1997)
- 5) T. Altan, S. I. Oh and H. L. Gegel : Metal Forming - Fundamentals and Applications, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1983)
- 6) American Society for Metals : Engineering Properties of Steel, ASM, Metals Park, Ohio, (1985)

- 7) ASM Handbook Committee : Metal Handbook, 9th Edition, Vol. 14, Forming and Forging, American Society for Metals, Metals Park, Ohio (1988)
- 8) K. Lange : Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, New York (1985)

(2001년 10월 13일 접수, 2002년 2월 20일 채택)