

단순보강링을 갖는 압출 금형의 치수 최적설계

안성찬* · 임용택**

(2002년 5월 2일 접수)

Optimal Design of Dimension of Extrusion Die with Single Stress Ring

S. C. An and Y. T. Im

Abstract

In this study, an optimal design technique was investigated for determining appropriate dimensions of components of the die set used in the extrusion process. For this, an axi-symmetric elastic finite element program for the analysis of deformation of the shrink fitted die set was developed with the Lagrange multiplier method to implement the constraint condition of shrink fit of stress ring. By coupling the rigid-viscoplastic analysis of extrusion process by CAMPform and elastic analysis of the die set, the optimization study was made by employing optimization program, DOT. Considering the various assembly conditions, optimal design was determined for a single stress ring case. It is construed that the proposed design method can be beneficial for improving the tool life of cold extrusion die set at practice.

Key Words : Optimization, Finite Element Method, Shrink Fit, Stress Ring, Extrusion, Compressive Prestress

1. 서론

압출가공공정에서 가장 중요한 구성 요소 중의 하나는 금형세트 설계이다. 일반적으로 압출가공공정에 사용되는 금형세트를 설계하는 데 있어서 우선 고려되어야 할 사항은 금형이 접촉압력을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다는 점이다. 특히, 냉간압출가공의 경우 접촉압력이 매우 크고, 금형의 천이반경과 금형벽에 편차가

가압하는 부분에서는 재료강도에 가까운 정도의 응력이 작용한다. 따라서, 냉간압출공정의 금형설계 시에는 마모 및 피로파손을 고려한 설계가 이루어져야 한다.

보강링을 가지는 압출금형에서의 치수 최적설계를 수행하기 위해서는 먼저 설계변수의 정의가 필요하다. 일반적으로 설계변수로는 금형과 보강링 각각의 외경과 내경 또는 그 값의 차 혹은 억지끼워맞춤 양 등을 선택할 수 있다. 예를 들어 단일보강링을 가지는 간단한 금형의

* 현대중공업 산업기술연구소 구조 연구실

** 한국과학기술원 기계공학과 전산재료성형설계 연구실

형상에서 설계변수들을 살펴보면 Fig. 1에서 a와 c는 각각 고정되어지는 값이다. a는 금형내곽반경으로, 생산되어지는 압출금형제품의 치수이므로 변경이 불가능하다.

그리고 c는 압출금형세트가 장착되어지는 프레스의 사양 등으로 제한되므로 이 역시 변경이 불가능한 값이므로 두 개의 치수는 고정되어진다. 따라서 변경될 수 있는 치수는 금형의 외곽반경과 보강링의 내곽반경이고, 두 반경의 차이가 억지끼워맞춤의 양이 될 것이다.

최적설계를 수행하는데 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나는 제한조건의 설정이라고 할 수 있다. 금형과 보강링의 조립시 보강링을 가열하게 되는데, 이때 보강링을 팽창시키는 가열온도는 보강링 재질의 소려 (tempering) 온도 이하이어야 한다. 이러한 제한조건이 사용되는 것은 보강링의 효과를 극대화하기 위해서 억지끼워맞춤의 양을 증가시키면 보강링을 팽창시키기 위한 가열온도는 더 상승하게 되는데 이렇게 되면 너무 높은 가열온도로 인한 보강링 재질의 저하를 가져올 수 있기 때문이다. 그러나 특별한 경우에 제한상승온도 이상으로 가열하여야 원하는 억지끼워맞춤의 양을 맞출 수 있는 경우도 있다.

필요 가열온도가 600°C 이상인 경우에는 보강링의 가열한계가 500°C라면 350~400°C로 가열한 후 프레스 등으로 압입한다. 이 때의 접합 면은 약 0.5~1.0°로 경사지게 가공한다. 즉 억지끼워맞춤과 압입끼워맞춤을 동시에 사용하는 것이다. 다른 제한조건으로는 선택된 설계변수가 현실성이 있는지를 제한하는 상하한값을 정의해두는 것이고 또 다른 제한조건으로는 금형과 보강링의 응력분포가 허용응력 이하라는 제한조건이 필요할 것이다.

보강링을 가지는 금형세트의 적절한 치수설계와 보강링을 가장 효과적으로 사용하기 위해서 최적화기법, 보

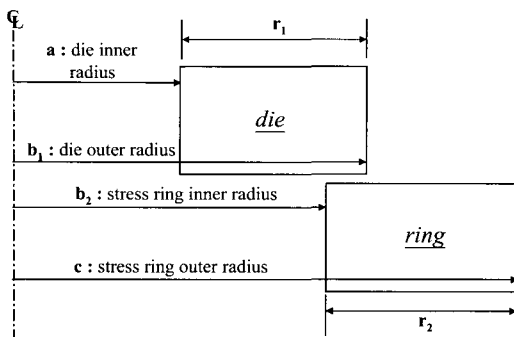


Fig. 1 Geometrical parameters of shrink fit die set

강링의 형태 변화 등이 시도되고 있지만 현재까지도 보강링을 가지는 금형세트의 설계는 주로 경험에 의한 경우가 많다.⁽¹⁾ 이러한 경험적 설계방법을 해석적 설계로 바꾸기 위한 첫번째 시도가 바로 보강링과 금형의 결합 후의 접촉면압을 계산하는 것인데, Hawkyard 등⁽²⁾은 두 접촉물체간의 변위를 가정하고 반복계산으로 평형점을 찾아서 접촉면압을 계산하고 이를 기반으로 보강링의 형태에 따라서 금형의 천이반경 영역에서의 응력을 최소화시키는 몇가지 방법을 제시하였다.

Forejt 등⁽³⁾은 최적설계 프로그램으로 복합단조금형의 최적설계를 수행하였고, Thomsen 등⁽⁴⁾은 금형과 보강링의 치수 및 금형 형상까지 고려하여 최적화를 수행하였고, Ham 등⁽⁵⁾은 피로와 마멸을 고려한 금형의 최적설계를 수행하였다. 최적화 외에도 여러 설계규칙들을 데이터 베이스화하여 금형설계의 자동화를 이루기 위한 연구⁽⁶⁻⁷⁾도 시도되었다.

보강링의 사용목적은 금형의 수명향상에 있으므로 금형의 수명, 특히 압출금형의 수명에 관한 연구도 많이 수행되어져왔다. Engel 등⁽⁸⁾은 보강링을 가지는 압출금형의 균열성장의 모사와 예측에 관한 연구를 수행하였고, Lange 등⁽⁹⁾은 금형 수명과 단조 생산비와의 관계 및 금형수명 향상을 위한 적용을 시도하였다. Engel 등⁽¹⁰⁾은 통계적 관점에서 금형의 수명을 예측하였다. 그리고 Lee 등⁽¹¹⁾은 금형 수명 예측의 한 부분인 압출금형에 대한 마모량을 계산하였다. Kocanda 등⁽¹²⁾은 금형의 수명에 영향을 미치는 여러 인자들을 정의하였고 압출금형의 탄소성해석⁽¹³⁻¹⁴⁾의 필요성을 보였다.

전통적인 보강링의 형태 이외에도 박판을 금형 주위에 감아서 보강링의 효과를 강화하는 연구도 진행되어왔다. Gronbaek 등⁽¹⁵⁾은 박판보강링을 해석하기 위해서, 감긴 박판은 같은 전단응력을 가진다는 가정 하에서 응력해석을 수행하였다. 또한 압출금형의 천이반경에서 Z축방향으로 큰 인장응력이 발생하여 파괴가 일어난다는 점에서 Z축방향의 압축응력을 주어서 금형의 수명을 향상시키는 연구를 수행하였다. 즉 전통적인 보강링의 효과와 축방향의 응력을 복합적으로 주어 금형의 수명을 향상시키고자 하였다.

금형의 수명 향상을 위한 목적함수의 선택은 탄성변형, 마모, 반복응력, 열영향, 탄성계수의 변화, 소성변형, 최대응력 등 여러가지가 있지만 본 연구에서는 피로파괴의 균열이 시작되는 압출금형의 내곽면에서의 원주방향 응력의 최대값을 목적함수로 선택하였다.

또한, 정밀가공의 관점에서 렌드부 변위의 값이 최소에 금형을 가공했을 시의 값을 유지한다면 치수정밀도가

좋은 압출제품을 생산할 수 있을 것이다. 따라서 이를 고려하여 변위를 목적함수 혹은 제한조건으로 사용할 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 강열점소성유한요소해석으로부터 얻어진 접촉압력을 이용하여 보강링을 가지는 금형세트의 탄성유한요소해석을 수행하고, 이로부터 압출가공 전 및 압출가공 중의 금형의 변위장과 예응력분포를 정확히 예측하고, 이로부터 금형의 피로수명을 가장 효과적으로 향상시킬 수 있는 예응력분포를 얻기 위한 금형과 보강링의 내, 외곽 반경의 치수를 결정하고자 하였다.

2. 유한요소법과 최적설계와의 연계

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 최적설계시스템의 개략도를 나타내준다. 이 그림에 의하면 먼저 형상이 정의된 압출공정에 대하여 CAMPform⁽¹⁶⁾을 이용한 강열점소성 유한요소해석을 수행하여 금형의 내면에 작용하는 수직력을 구한다. 이렇게 구해진 수직력을 경계조건으로 보강링을 가지는 금형의 탄성유한요소해석을 수행한다.

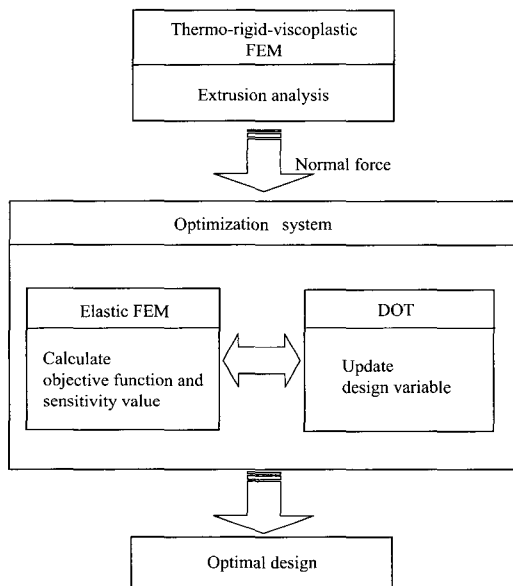


Fig. 2 Shrink fit optimal design sequence

여기서 계산된 응력으로 목적함수를 계산하고 DOT 프로그램⁽¹⁷⁾을 활용한 최적설계프로그램으로 다음 단계의 설계변수를 찾는다. 이때 최적화기법으로는 sequential quadratic programming법을 사용하였고 이러한 설계변

수들을 찾기 위한 민감도 계산은 유한차분법을 사용하게 된다.

유한차분법을 이용한 민감도 계산은 주어진 설계변수들로 해석된 결과와 특정한 설계변수의 차분에 의해서 얻어진 해석결과를 이용하여 선형근사를 통해서 민감도를 구하는 방법을 말한다. 이런 방법의 장점은 민감도 계산에 있어서 중간 과정을 고려하지 않고 단지 초기값과 설계변수의 차분된 해석결과만을 필요로 하므로 적용하기 쉽고 편리하다. 이와같은 과정을 반복하여 최종적으로 최적의 설계변수를 찾는 것이다.

Fig. 3은 최적설계과정의 흐름도를 나타낸 것으로서 이를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 금형과 보강링의 초기 형상과 설계변수의 초기 값을 정의한다.
- (2) 앞 단계에서 정의된 형상으로 유한요소모델을 형성한다.
- (3) 정의된 형상과 설계변수의 초기 값 그리고 유한요소모델을 이용하여 탄성유한요소해석을 수행한다.
- (4) 정의된 설계변수들을 독립적으로 섭동시켜 변화된 설계변수에 따른 유한요소모델을 생성하고, 이를 이용해 유한요소해석을 수행한다.

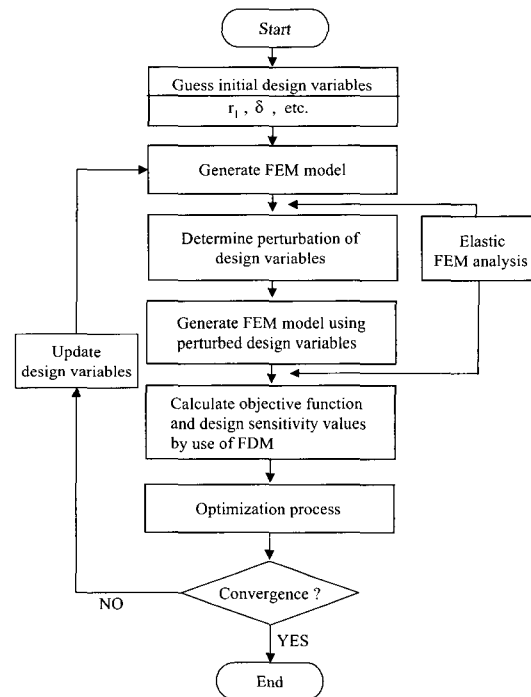


Fig. 3 Flow chart of optimization procedure

(5) (3), (4)에서 얻어진 데이터로 목적함수, 제한조건의 값을 구하고 유한차분법으로 민감도를 구한다.

(6) 구해진 민감도 값으로 최적화기법에 의해서 새로운 설계변수를 찾아낸다.

(7) 수렴조건을 판단하고 조건을 만족치 못할 시에는 (3)으로 돌아가서 수렴조건을 만족할 때까지 위의 과정을 반복한다.

3. 단일보강링을 가지는 금형세트의 치수 최적설계

보강링 사용의 궁극적인 목표는 금형의 내면에 원주방향 압축잔류응력을 생성시키는 것이므로 문제의 초점은 원주방향응력이다. 따라서 이 절에서는 단일보강링에 의한 압축잔류응력을 가장 효과적으로 생성하기 위한 최적화해석을 수행하였다.

본 최적화 문제에서는 역지끼워맞춤의 조립방법을 사용함을 가정하고 제한조건으로서 보강링의 가열한계온도는 500°C로 가정하였다. Fig. 4에는 해석에 사용된 유한요소모델에서 각각의 설계변수와 치수간의 관계를 나타내었다. 유한요소모델의 경계조건으로는 금형세트의 밑면은 Z축방향으로 구속되어 있고 강열점소성유한요소 해석으로부터 얻어진 접촉압력이 금형의 내표면에 가해지고 금형과 보강링간에는 접촉에 따르는 변위제한조건이 사용되었다.

압출공정에 사용된 가공재료는 AISI5120으로 가공경화상수 K값은 872.3MPa이고 가공경화지수 n은 0.18이다. 금형과 공작물 사이의 마찰 조건은 전단마찰 상수를 0.05로 가정하였다. 금형과 보강링에 사용되어진 재료는, 금

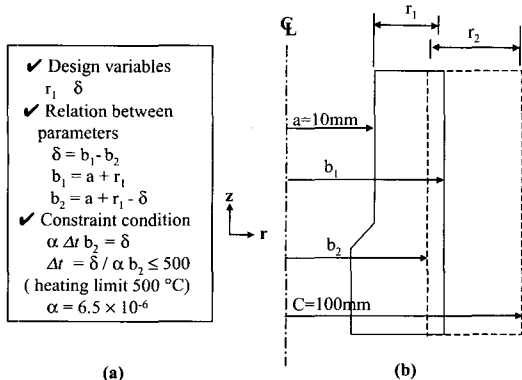


Fig. 4 Problem definition of optimization: (a) design variable and constraint definitions and (b) geometrical variables for the optimization model

형의 경우는 초경합금으로서 탄성계수가 540GPa이고 프와송비가 0.23이다. 보강링은 SKD61로서 탄성계수가 210 GPa이고 프와송비가 0.3이다. 각각의 항복응력은 3000MPa과 1200MPa이다.

해석에서 사용된 목적함수는 금형 내표면의 절점들의 원주방향응력들 중 최대값으로 하였다. 최적화의 과정은 이러한 최대의 응력 값을 최소로 만드는 설계변수 값을 찾는 것이다. 이러한 응력의 최대값을 최소로 하는 방법은 피로파괴의 관점에서 최대값을 최소로할수록 전체인 응력의 분포는 균일해진다는 점에서 착안한 것이다.

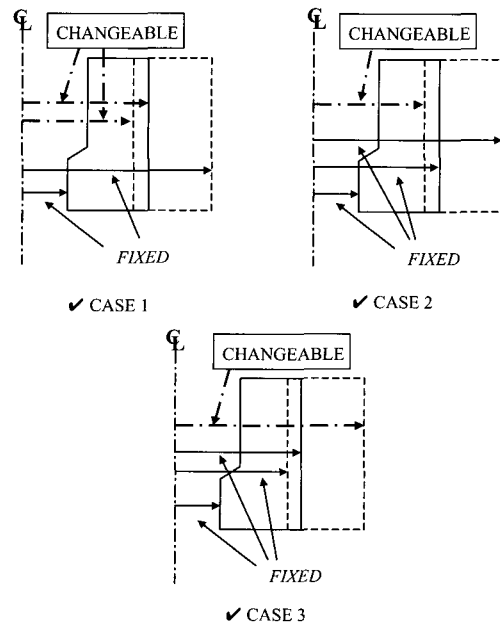


Fig. 5 Three cases of optimization using single stress ring

3.1 단일보강링의 응력 최적화

본 연구에서는 단일보강링의 응력 최적화 경우를 Fig. 5와 같이 세가지로 나누어 해석하였다. 먼저 첫 번째는 금형세트의 크기가 제한되어지는 경우이다. 이 경우에는 금형세트의 외경이 한정되어지고 금형의 형상은 제품의 생산치수에 의해 결정되므로 변경이 가능한 것은 금형의 외표면경과 보강링의 내표면경이다. 두번째는 금형의 크기도 이미 결정되어 있고 금형세트의 크기도 결정되어 있을 때 변경 가능한 것은 금형과 보강링간의 역지끼워맞춤의 양이 될 수 있다. 마지막으로 세번째는 보강링의 외경이 어느 정도 확장이 가능한 경우이다.

Table 1 Initial values of design variables and results of optimization using single stress ring

model parameters	a	b ₁	b ₂	c	r ₁	r ₂	δ
initial value (mm)	10	80	79.825	100	70	20.175	0.175
design variables	initial value	lower limit value	optimal value	upper limit value			
r ₁ (mm)	70	10	19.75	80			
δ (mm)	0.175	0.05	0.0964	0.3			
objective function value	1024.3 MPa	-	594.47 MPa	-			

Table 2 Initial values of design variables for four trials and the results of optimization processes

		Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4
initial values	b ₁ (mm)	80	85	50	20
	δ(mm)	0.175	0.225	0.3	0.3
	objective function value	1024.3 MPa	1022.4 MPa	208.87 MPa	-2159.8 MPa
optimal values	b ₁ (mm)	29.75	30.037	29.49	29.734
	δ(mm)	0.0964	0.0973	0.0955	0.0963
	objective function value	594.47 MPa	595.08 MPa	594.52 MPa	594.8 MPa

즉, 금형세트의 크기가 어느 정도 크게 될 수 있는 경우다. 앞의 세 경우에 대하여 금형의 내면에 발생하는 원주방향응력의 최대값을 최소화하는 최적설계를 수행해 보았다.

3.2 금형세트의 사양이 제한되는 경우의 최적화

해석에 사용된 설계변수의 초기치와 각각의 금형과 보강링의 형상치수는 Table 1에 나타내었고 최적화수행의 결과는 Table 1과 Fig. 6에 나타내었다. 초기의 목적함수 값은 1024.3MPa이었지만 최적화 후의 목적함수는 594.47MPa로 줄어들었다. 결과에서 압축잔류응력의 효과는 최적화 이후 금형의 내면에서 전체적으로 증가하였

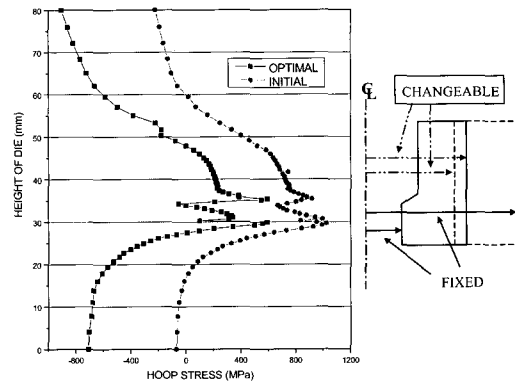


Fig. 6 Comparison of hoop stress along the die inner surface between initial and optimal states

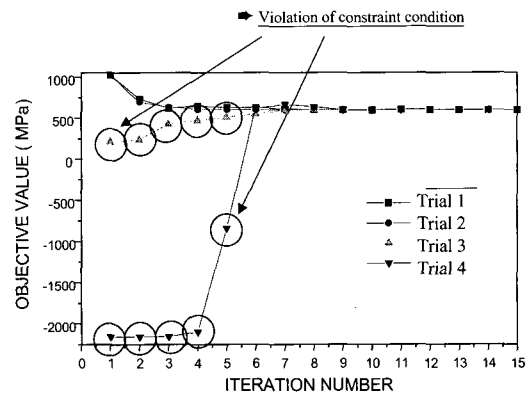


Fig. 7 History of objective function values with different initial values

고, 원주방향응력의 최대값도 감소되었음을 알 수 있다. 최대원주방향응력의 감소는 약 42% 정도 달성되었다.

그리고 금형세트의 전체적인 형상은 금형의 두께가 보강링의 두께에 비해서 많이 작아짐을 알 수 있고 이것은 외곽 보강링의 두께가 두꺼울수록 압축잔류응력효과가 커지기 때문이다. 만일 금형에 단일보강링으로 압축잔류응력의 효과를 충분히 얻지 못하겠다고 판단되어지면 다중 보강링의 고려가 필요하고 이에 대한 최적설계가 또한 필요할 것이다.

Fig. 7과 Table 2에는 설계변수의 초기치를 다르게 하였을 때 최적화과정에서 목적함수의 변화과정을 도시한 것으로 초기단계에서 최적결과로 거의 접근함을 알 수 있다. Trial 3과 4의 경우에 초기 목적함수의 값이 최적

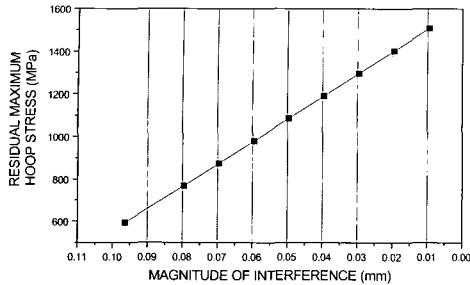


Fig. 8 Variation of residual maximum hoop stress according to magnitude of interference fit

의 목적함수 값보다 더 작은 값을 가짐에도 다시 최적값으로 증가하여 수렴하는 것은 초기설계변수가 보강링 가열한계온도의 제한조건을 위반하였기 때문이다.

이들 결과에서 볼 수 있듯이 억지끼워맞춤의 양은 가열한계온도의 최대값임을 알 수 있는데 다음절에서는 이러한 억지끼워맞춤의 양을 변화시키면서 금형 내면의 절점들의 원주방향응력의 거동을 살펴보았다.

3.3 억지끼워맞춤 양을 변화시킬 경우의 최적화

앞 절에서 해석된 최적화의 결과는 억지끼워맞춤의 양이 가열한계온도의 최대값이 됨을 볼 수 있었는데 이와 같은 결과로부터 억지끼워맞춤의 양을 점차 감소시키면서 금형 내면의 절점들의 원주방향응력의 거동을 살펴보았다. Fig. 8에 그 결과를 나타내었는데 예상대로 가장 큰 억지끼워맞춤 양을 가지는 금형이 가장 작은 최대 원주방향응력을 가졌다. 따라서 단일보강링의 최대 원주방향응력을 최소화하는 최적화문제에서 억지끼워맞춤의 양

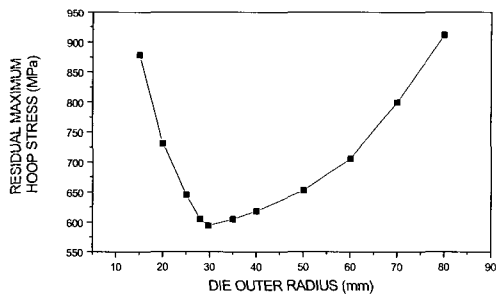


Fig. 9 Variation of residual maximum hoop stress according to die outer radius

Table 3 Residual maximum hoop stress according to die outer radius

die outer radius b_1 (mm)	magnitude of interference fit δ (mm)	maximum hoop stress (MPa)
15	0.0486	878.4
20	0.0648	731
25	0.0810	645
28	0.0907	604.7
29.75	0.0964	594.47
35	0.1134	605
40	0.1296	618
50	0.1620	652.8
60	0.1944	706.1
70	0.2268	799.7
80	0.2592	911.9

은 가열한계온도 제한조건을 최대값이 됨을 알 수 있다.

이를 요약하면 금형 내면의 압축잔류응력의 효과를 최대한으로 얻기 위해서는 가능하면 큰 억지끼워맞춤의 양을 가져야 함을 알 수 있다. 하지만 이러한 억지끼워맞춤의 양에도 제한이 따르게 된다.

3.4 단일보강링 최적화결과의 지역값유무

앞의 두 절에서 초기치를 달리해서 최적화를 수행하였고 억지끼워맞춤의 양을 변화시키면서 그 양이 제한조건을 최대가 됨을 확인해 보았다. 이제 최적화해석의 결과가 지역값인 지 전역값인 지의 유무를 판단하기 위해서 억지끼워맞춤의 양은 항상 제한조건을 최대값으로 설정하고 금형의 외곽반경을 변화시키면서 최대 원주방향응력값의 변화를 얻어서 Fig. 9와 Table 3에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 최적해는 지역값이 아닌 전역값임을 알 수 있다. 그리고 최적의 금형외곽반경 값 주위에서는 원주방향최대응력의 차가 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 초기치를 달리하였을 때 최적값에서 얻어지는 설계변수의 차이가 발생할 수도 있음을 Table 2에서 볼 수 있다.

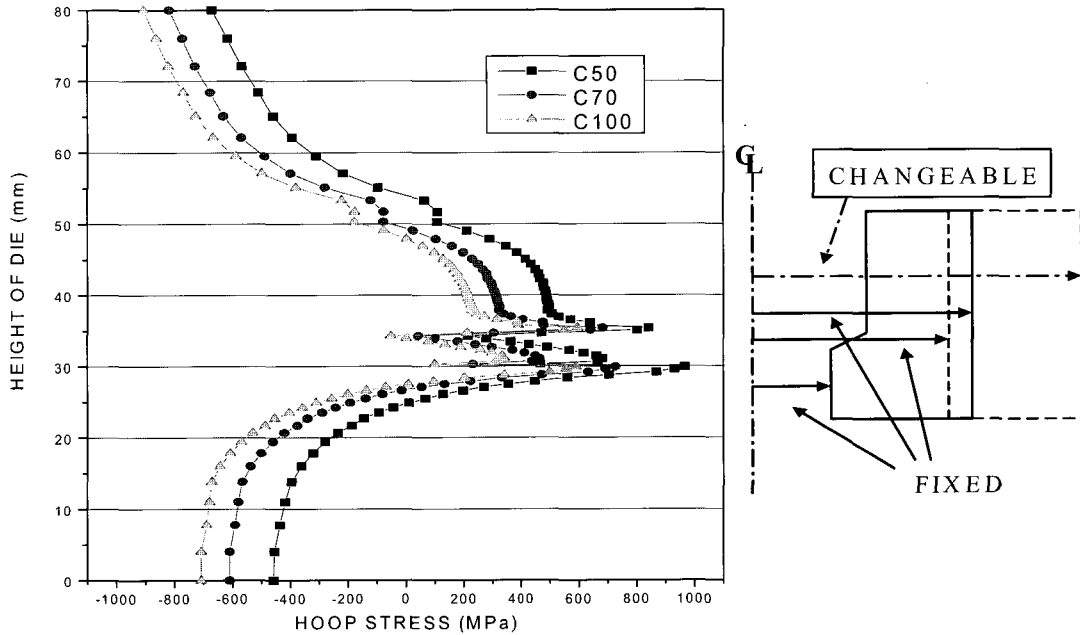


Fig. 10 Comparison of hoop stress along the die inner surface according to ring outer radius.

3.5 금형세트 외경을 확장시킬 경우의 최적화

3.2절의 최적화해석 결과와 동일하게 금형세트의 치수를 결정하고 금형세트의 외곽반경만 50, 70, 100mm로 증가시키면서 탄성해석을 수행해 보았다. Fig. 10에서 나타나듯이 금형세트의 외곽반경이 커질수록 압축잔류응력의 효과는 증대됨을 알 수 있다. 다만 억지끼워맞춤의 양을 변화시키는 것에 비해서는 최대 원주방향응력의 변화가 적음을 알 수 있다.

4. 결론

단일보강링을 가지는 금형의 내면의 최대 원주방향응력을 최소화하는 치수 최적설계의 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- (1) 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 보강링 사용 방법에 대한 치수 최적설계 및 탄성해석을 수행하였다.
 - 금형세트의 크기가 제한되는 경우.
 - 억지끼워맞춤 양만이 변경 가능한 경우.
 - 보강링의 외경이 어느 정도 확장 가능한 경우.
- (2) 단일보강링을 가지는 금형세트의 치수 최적화해석

으로부터 억지끼워맞춤 양이 가열한계온도의 최대값이 될 때 금형내면의 압축잔류응력이 최대가 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 최적화해석에서는 설정된 단일보강링의 두개의 치수 설계변수는 하나가 됨을 알 수 있었다.

(3) 더 많은 압축잔류응력의 효과를 얻기 위해서 다중 보강링의 사용을 고려해 볼 수 있다.

참고 문헌

- (1) Lange, K., 1985, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill, Inc.
- (2) Hawkyard, J. B., Hirai, T., Ishise T., and Katayama, T., 1984, "Optimisation of Shrink Ring Interference Configuration for Metal Forming Die", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 11, pp. 912~917.
- (3) Forejt, M., Krejeova, J., and Kapitanova, R., 1997, "The Optimization of Compound Forming Dies Geometry", ICIT '97.
- (4) Thomsen, S. G., 1987, "Optimization of Dies for Axisymmetric Cold Forward Extrusion", Engineering

- Optimization, Vol. 11, pp. 13~20.
- (5) 함현욱, 김병민, 1999, "피로와 마멸을 고려한 냉간압출 금형의 최적설계", 대한기계학회 '98추계학술대회 논문집 A, pp. 777~782.
 - (6) 최재찬, 김병민, 진인태, 김형섭, 1999, "퍼스널 컴퓨터에 의한 냉간단조공정 및 금형설계의 자동화에 관한 연구(I)", 대한기계학회논문집, 제12권 제4호, pp. 712~720.
 - (7) Kim, H.S. and Im, Y.T., 1998, "An Expert System for Cold Forging Process Design Based on a Depth-First Search", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 95, pp. 262~274.
 - (8) Engel, U. and Hansel, M., 1990, "FEM-simulation of Fatigue Crack Growth in Cold Forging Dies", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 355~360.
 - (9) Lange, K., Cser, L., Geiger, M., and Kals, J. A. G., 1992, "Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming", Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 667~675.
 - (10) Engel, U. and Hinsel, C., 1995, "Tool Life in Cold Forging", 28th ICFG Plenary Meeting, pp. 8.1~8.16.
 - (11) Lee, G. A. and Im, Y. T., 1999, "Finite-element Investigation of the Wear and Elastic Deformation of Dies in Metal Forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 123~127.
 - (12) Kocanda, A., Cacko, R., and Czyzewski, P., 1996, "Some aspects of die deformation in net-shape cold forging", Advanced Technology of plasticity, Vol. 1, pp. 367~370.
 - (13) 서대윤, 이민철, 전만수, 1998, "보강링에 의하여 예압된 냉간단조금형구조의 탄성유한요소해석", 한국소성가공학회, 제7권 제4호, pp. 347~353.
 - (14) 이정환, 이영신, 최종웅, 강종훈, 1999, "냉간단조용 금형의 탄성변형 예측", 한국소성가공학회 '99추계학술대회논문집, pp. 108~111.
 - (15) Gronbaek, J. and Nielsen, E. B., 1997, "Stripwound Containers for Combined Radial and Axial Prestressing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 30~35.
 - (16) CAMPform2D v.1.5 USERS MANUAL, 2002, <http://camp.kaist.ac.kr/campseries>.
 - (17) DOT USERS MANUAL, 1993, Vanderplaats, Miura and Associates, Inc.