

자동차 냉방기용 내부 풀리의 냉간 단조 공정 설계

김동진*, 정덕진**, 김병민***, 최재찬***

* 부산대학원, ** (주) 풍산정밀,

*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

Process Design in Cold Forging of a Inner Cylindrical Pulley for automobile airconditioner

Kim D. J.*, Jeong D. J.***, Kim B. M.***, Choi J. C.***

* Pusan National University, Graduate School

** Poongsan Precision Co.

*** ERC for NSDM, Pusan National University

Abstract

The inner pulley is automobile component used as airconditioner clutch assembly. In cold forging of the inner pulley, the design conditions are the same between inner length and outer length, the uniform hardness and the no shape change in inner fillet radius due to a piercing.

In industries, the design of forging processes is performed based on an experience-oriented technology, that is, designer's experiences and expensive trial and error. Using the rigid-plastic finite element simulation, we propose the optimal process conditions and design of preform or redesign of final product shape without defects predicted by metal flow, distribution of strain, forging load during forging processes from initial workpiece to final product.

1. 서 론

냉간단조로 생산되는 제품은 일반적으로 단공정으로 생산되는 것이 아니라, 초기의 간단한 소재 형상을 좀 더 복잡하고 결합이 없는 제품으로 만들기 위해서 몇 번의 예비성형공정을 거치는 다단계 성형공정으로 이루어진다. 따라서 냉간단조 공정설계의 가장 중요한 사항은 예비성형 공정수 및 각 공정의 예비성형체형상이다.

새로운 제품의 생산을 위한 성형공정의 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여, 실제의 금형, 소재 유동, 금형 내의 충전도와 성형하중 등의 상세한 정보를 제공할 수 있는 기법들이 필요하다. 최근에는 컴퓨터와 수치기법의 발전으로 컴퓨터를 이용한 여러가지 방법들이 성형 공정설계 및 금형설계에 활발히 이용되고 있고

[1-3], 특히 유한요소법해석은 이와 같은 정보들을 상세히 제공할 수 있어 생산과정의 시행착오를 줄일 수 있다. Lee 등은 유한요소법을 이용하여 등속 조인트하우징의 공정설계를 하였으며[4], Kobayashi 등은 역추적기법이라는 새로운 개념을 도입하여 셸 노이징(shell nosing)공정의 예비성형체 설계를 하였으며[5], Hwang 등은 평면변형 압연과 축대칭 원판 압축공정에 대해서 예비성형체 설계를 하였고[6,7], Kang 등은 블레이드단조 및 압연 공정의 예비성형체 설계에 유한요소법을 이용하였다[8,9]. 또한 Kim 등은 신경망과 유한요소법을 이용하여 금형내 충만을 만족하는 초기소재를 예측하였고[10], Yang 등은 유한요소법과 퍼지로그를 이용한 전방투사법을 이용하여 금형내 충만을 만족하는 초기 소재를 예측하였다[11].

자동차 냉방기는 냉매를 가압하는 압축기(compressor)부와 차량의 엔진으로부터 동력을 공급받아 단속역할을 해 주는 자장형 클러치부(magnetic clutch assembly)로 구성되어 있다. 클러치부는 내부 풀리에 그루부(groove)형상을 가진 시브(sheave)와 베어링으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 원가 절감 및 생산량 증대 방안으로 내부 풀리의 냉간단조 성형공정을 개발하는 것이다.

본 연구에서는 강소성 유한요소법으로 여러 가지 초기소재 형상을 먼저 선정하여, 한 단계작업으로 최종형상의 성형 가능성을 검토하였다. 또한 성형공정 동안의 소재 변형양상과 유효변형률분포로부터 발생 가능한 결함을 예측하여 공정의 개선 가능성을 조사하였으며, 이러한 결과들을 기초로 하여 예비성형체를 예측하였고, 예측된 예비성형체가 단조품의 설계조건을 만족하지 못한다면, 기계도면으로부터 최종 단조품의 형상을 다시 설계하여 제품에 요구되는 설계조건을 만족시키는 단조품의 형상도 예측하였다.

2. 소재 실험 및 공정 설계 순서

내부 풀리 생산에 이용되는 소재는 AISI 1008이다. 소재에 대해 압축실험을 하여 다음과 같은 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 69.0499 \bar{\epsilon}^{0.2186} \quad (\text{N/mm}^2)$$

소재와 금형 사이의 접촉면에서는 인산염 피막처리후 본드 루베(Bond Lube) 윤활처리를 하였다. 링 압축 실험을 통하여 마찰 상수값을 측정한 결과, 마찰 상수는 0.1 이었다.

본 연구에서 내부 풀리의 최종제품을 냉간단조로 성형하기 위한 공정순서를 그림 1에 나타내었다. 먼저, 실제 자동차용 에어컨 클러치로 사용되는 내부 풀리의 기계도면으로부터 최소한의 기계가공을 요구하는 단조도면을 작성한다. 단조도면 형상으로 성형하기 위하여 다양한 초기소재 형상을 선정하고, 단조도면 형상으로 성형해석을 한다. 해석 결과를 검토하여 결과에 만족하면, 예비성형체가 필요없는 한 단계 작업만으

로 충분한 공정임을 알 수 있고, 만족하지 못하면 한 단계 작업만으로 성형할 수 없다. 따라서 초기소재 형상과 최종형상의 중간단계인 예비성형체를 예측한다. 초기소재를 예측된 예비성형체 형상으로 성형한 후, 예비성형체를 최종형상으로 성형하는 공정을 거친다. 만약 결과에 만족하지 못하면, 예비성형체를 다시 예측하여 최종형상으로 성형하는 과정을 반복함으로써 가장 적절한 예비성형체 형상을 선정하고, 결함이 없는 최종제품을 성형한다. 예비성형 공정후 최종제품을 만들 수 있다 하여도 성형된 최종제품이 설계조건을 만족하지 못한다면 최종 단조품의 형상을 변경하여 제품형상뿐 아니라 다른 여러 가지 설계조건을 만족시키는 최종 단조품의 형상도 예측한다.

3. 이중 원통형 내부 폴리의 공정설계

3.1 설계 조건 및 단조 도면의 작성

내부 폴리의 기계도면은 그림 2와 같다. 내부 폴리의 설계 조건은 내·외부 압출부 길이가 기계가공량을 고려한 길이만큼 길면서 동일해야한다. 그리고 내부 폴리는 고속으로 회전하기 때문에 최종 단조품 내·외부 압출부의 경도는 폴리 내부에 장착된 베어링이 빠져 나오는 것을 방지할 수 있도록 균일하게 분포되어야 한다.

이상과 같이 제품에 요구되는 설계조건이 까다롭고 최종 피어싱 공정으로 인하여 냉간단조로서 기계도면의 형상대로 단조하는 것이 불가능하므로 최소한의 기계가공량을 고려한 단조도면이 필요하다. 단조품의 외경은 기계도면의 제품 외경과 같게하여 기계가공을 줄일 수 있도록 하였으며 압출부의 길이는 34mm로 기계가공량을 고려하여 기계도면의 길이보다 길게하였다. 외부 바닥부는 압출후 발생하는 플래쉬 부분을 트리밍하고 기계가공후 정확한 바닥 치수를 맞출수 있도록 여유를 두어 6.5mm로 하였다. 그림 3에 단조후 기계가공량을 최소화시킬 수 있는 최종 단조도면을 작성하였다.

3.2 초기 빌렛 선정

일반적으로 냉간 단조에서의 초기 빌렛 크기는 최종제품의 직경 중의 하나로 선택한다. 따라서 본 연구에서는 첫 번째로 최종 단조도면의 직경에 의해서 직경이 110mm인 소재를 선정하였고, 최종제품의 체적이 $125,810\text{mm}^3$ 이기 때문에 높이 16.6mm인 초기소재를 택하였다.

선정된 초기소재로 최종 단조도면 형상대로 성형하였다. 그림 4에서와 같이 내·외부 압출부 길이의 차는 7.029mm였고, 내부 압출길이는 기계가공량을 고려한 한계길이 34mm보다 작았다. 내부 부분에 단이 있어, 이것이 유동을 억제시켜 외부에 비해 압출 방향의 유동 속도가 느려 내부 압출길이가 외부 압출길이보다 더 적게 성형되었다.

이 초기소재로는 제품 성형이 불가능하므로 내·외부 압출부의 유동을 제어할 수 있는 다른 초기소재를 선정하여 제품을 다시 성형하였다. 내부 압출길이를 더 길게

성형하기 위해서는 외부 압출길이의 유동을 억제시킬 필요가 있었다. 그래서 외부 길이의 압출방향의 유동을 느리게 하기위하여 두 번째로 첫 번째 소재와 체적이 동일하면서 외부 직경은 첫 번째보다 작고 높이는 높은, 직경 100mm, 높이 21.22mm인 초기 소재로 제품을 다시 성형하였다. 유동은 먼저 업세팅이 되면서 압출이 이루어지기 때문에 외부 압출길이부의 압출방향 유동이 첫 번째 것에 비해 느릴 것으로 생각되었다. 성형 중 소재 유동은 내부가 먼저 압출되었으나, 성형 결과 외부 압출부 길이가 더 길게 성형되었다. 내부 압출길이는 첫 번째 제품보다 길었지만 한계길이 보다 작았고 내·외부 압출부 길이차도 6.651mm이었다. 첫 번째 소재로 성형한 것보다는 높이차가 줄었었지만 설계조건은 만족하지 못 하였다. 그러나 소재의 직경을 줄이고 소재높이를 높임으로서 내·외부 압출부의 길이차를 줄일 수 있음을 알 수 있어, 초기 소재의 형상으로 재료의 유동을 제어할 수 있을 것으로 생각되었다. 그래서 직경을 더 줄이고 소재의 높이가 높은 소재를 다시 선정하여 다시 성형하기로 하였다.

세 번째로 소재 체적은 동일하면서 외부 직경이 90mm, 높이가 28.35mm인 소재를 선정하여 성형하였다. 이 소재는 제품이 성형되기 전에 유동 결합이 생겼다(그림 5). 소재의 형상을 변경함으로써 소재의 유동은 제어할 수 있었으나, 소재의 유동결합이 생겨 초기 소재의 형상을 변경하는 것만으로는 소재의 유동을 제어할 수 없음을 알았다.

위의 세 가지 초기소재 형상의 해석 결과로, 초기 소재형상을 변경하는 것 만으로는 최종제품의 내·외부 압출길이를 동일하게 할 수 없음을 알았다. 그래서 이 최종제품은 단공정만으로는 성형이 불가능하고 예비성형 공정이나 소재 유동을 제어하기 위하여 최종 단조품의 형상을 변경하는 것이 불가피함을 알 수 있었다.

3.3 예비성형체 선정

내부 폴리의 예비성형체는 앞의 해석 결과로부터, 폴리 내부 압출길이가 외부 압출길이에 비해 7mm정도 짧으므로 내부를 7mm 먼저 압출하는 형상으로 정하였다(그림 6). 성형된 예비성형체의 중심부를 피어싱한 후 열처리하여 최종제품을 성형하였다. 내·외부 압출길이가 한계길이인 34mm보다 길게나왔고, 내·외부 압출부의 높이차가 0.7mm로 최종 단조 도면과 유사하게 제품의 형상이 나왔다. 예비성형체의 유효 변형률 분포를 보면 내부 압출부 끝단은 거의 변형을 받지 않음을 알 수 있었고(그림 7), 최종 단조품의 경도를 측정해본 결과 그림 8과 같이 외부 압출부의 경도분포는 HRB 92~98로 균일하였으나 내부 압출길이부의 경도 분포가 HRB 65~94로 불균일하였다. 외부 압출부는 최종 공정에서만 성형되기 때문에 가공경화를 받아 경도가 균일하게 분포하였다. 그러나 예비성형된 내부 압출부는 열처리로 인해 최종 공정에서 더 이상의 변형을 받지 않기 때문에 외부 압출부에 비해서 가공경화 정도가 작아서 특히 내부 압출부의 끝단에서의 경도가 다른 곳에 비해 매우 작았다. 이 공정은 제품의 형상으로는 설계조건을 만족하였으나 균일한 경도분포조건은 만족하지 못하여 부적절한 공정임을 알 수 있었다.

균일한 경도분포를 얻기 위해서는 예비성형공정에서 받은 변형을 유지해야 할 필요가 있었다. 그래서 예비성형체를 열처리하지 않고 최종 단조도면대로 성형해 보았다. 성형 결과 내·외부 압출부의 높이차가 2.54mm로 열처리하여 성형한 결과보다 높이차가 컸다. 예비성형공정에서 내부 길이부가 압출되면서 가공경화를 받았고, 외부 길이부의 소재는 가공경화를 거의 받지 않았기 때문에 외부 압출부는 열처리 하지 않은 경우보다 더 길게 성형되었고, 내부 압출부는 열처리 하지 않은 경우보다 작게 성형되었다(그림 9). 유효변형률 분포를 보면 내부 압출부의 끝단까지 변형을 받아 경도 분포가 균일할 것으로 생각된다(그림 9). 그러나 I 부분의 변형률을 보면 거의 변형을 받지 않은 비변형 영역(dead metal zone)이 생긴 것을 알 수 있었다. 이 부분은 다른 부분에 비해 상당히 취약하여 풀리가 고속으로 회전하여 동력을 전달할때 파단이 생길 것으로 생각된다.

예비성형공정으로 제품의 형상 설계조건은 만족시킬 수 있었으나 강도 설계조건은 만족시킬 수 없었다. 따라서 제품의 형상 및 강도 설계 조건을 만족시킬 수 있는 공정이 필요하다. 기계도면을 다시 검토한 결과 제품의 형상 설계조건 및 강도 설계조건을 만족시키기 위해서는 단공정으로 제품을 생산하는 것이 좋을 것으로 생각되어 단조품의 형상을 다시 작성하였다. 내·외부 압출부의 유동을 동일하게 제어할 수 있는 금형의 형상을 결정하였고 경도 분포를 균일하게 하기 위하여 내·외부가 동시에 같은 정도의 가공경화를 받을 수 있도록 단조품의 형상을 재설계하였다.

3.4 소재 유동 제어를 위한 금형 설계

단조품의 최종 형상은 먼저 내·외부 압출부의 유동을 동일하게 제어할 수 있는 형상으로 변경하는 것이다. 그림 4의 해석결과로부터 외부 압출부의 유동 속도는 내부 압출부 유동 속도보다 빠르다는 것을 알 수 있다. 그래서 외부 압출부의 유동을 억제시키기 위하여 금형 외경부에 단을 주어 소재의 유동속도를 제어하기로 하였다. 그림 4의 해석결과에서 외부 길이가 내부 길이보다 7mm 정도 더 길다. 그래서 이 길이에 해당하는 소재 체적만큼을 빼내기 위해 하부 금형의 외부에 내경부분과 동일한 5mm의 단을 주었다. 그리고 단조품의 형상에 따라 직경을 115mm로 하였고, 한계길이 34mm와 외경 단부분의 체적양을 계산해서 초기 소재의 높이를 16mm로 하여 최종단조품의 체적이 134,800mm³ 이 되게하였다(그림 10).

선정된 초기소재로 제품을 성형해보았다. 성형 결과 내·외부 압출부의 높이는 한계길이보다 길었고, 두 압출부의 높이차는 0.783mm로 형상 설계조건을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다(그림 11). 외부에 단을 주는 것이 외부 압출부의 소재유동을 크게 지연시켜 내부 압출부와 높이차를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 다음으로 유효변형률 분포를 보면 단조품 전체가 변형을 받아서 예비성형공정과 같은 비변형 영역이 없어서 베어링과 허브 부분으로 연결되는 곳의 강도에는 큰 문제가 없을 것으로 생각된다. 그리고 내·외부 압출부가 거의 균일하게 가공경화를 받아서 경도 분포도 균일할 것으로 생각된다. 최종단조품의 경도를 측정해본 결과 그림 12과 같이 외부 압출

부의 경도분포는 HRB 93~96로 균일하였으며, 내부압출부의 경도분포도 HRB 97~102로 균일함을 알 수 있었다. 소재 유동을 제어하기 위하여 최종 단조품의 형상을 변경한 위의 공정이 제품에 요구되는 형상설계조건과 강도조건을 모두 만족하는 공정임을 알 수 있었다.

4. 최종 제품의 설계 조건에 적합한 공정 선정

위의 해석결과들로부터 성형 가능한 공정은 다음의 3가지 경우이다. 첫 번째 열처리를 한 예비성형공정은 내·외부 압출부의 동일한 길이 조건은 만족하였으나, 균일한 경도 분포의 설계조건은 만족하지 못하였다. 열처리로 인해 경도 단속이 발생하여 최종 제품의 경도분포가 불균일하였다. 성형 하중은 예비성형공정의 경우 1,671톤으로 성형 해석을 한 것중에서 제일 높은 하중이 나왔고 최종공정에서는 913톤의 하중이 나왔다.

두 번째 열처리를 하지 않은 공정은 내·외부 압출부의 동일한 길이 조건을 만족하였고, 균일한 경도 분포의 설계조건도 만족하였다. 그러나 베어링과 허브부분으로 연결되는 부분에서 변형을 거의 받지 않는 비변형 영역이 발생하여 냉방기 운전시 이 부분에서 제품강도에 문제가 있을 것으로 생각된다. 성형하중은 최종공정에서 918톤으로 열처리를 한 예비성형공정과 비슷하였다. 일반적으로 열처리를 한 공정과 열처리를 하지 않은 공정은 유효변형률 분포나 하중이 차이가 많이 나지만, 위의 두공정은 그 성형결과를 비교해 볼때 예비성형공정에서 제품의 성형정도가 적기 때문에 가공경화 정도가 적고, 가공경화를 받은 부분보다는 가공경화를 받지 않은 부분이 최종 제품의 성형에서 가공경화를 받았다. 그렇기 때문에 최종 성형공정에서 두 공정의 성형하중이 비슷하게 나왔다. 위의 두 공정 모두 다 제품이 요구하는 설계조건을 만족하지 못하였다. 그리고 추가 공정으로 인하여 금형 제작비와 열처리 공정에 따른 유효처리 등의 추가 공정으로 제품의 단가 상승요인이 발생하는 문제점이 생긴다.

세 번째 공정은 기계도면의 외경에 내경과 동일한 5mm의 단을 주어 단조품의 형상을 결정한 경우이다. 내·외부 압출부의 길이 차이를 상당히 줄일 수 있어 제품이 요구하는 형상설계조건을 만족할 수 있었고, 성형하중은 1,191톤이었다. 성형된 제품의 유효변형률 분포를 보면 제품이 전체적으로 가공경화를 받아서 비변형 영역이 생기지 않았고, 특히 내·외부 압출부의 가공경화정도가 비슷하여 고른 변형정도를 나타내었다. 그리고 경도 분포도 균일하여 제품이 요구하는 강도설계조건을 만족할 수 있었다. 세 번째 공정은 기계가공량이 위의 두 공정보다 상대적으로 많기 때문에 소재 손실이 많이 발생하지만, 단공정으로 제품을 생산할 수 있기 때문에 전체적인 제품의 단가는 낮을 것으로 생각된다. 그리고 예비성형공정을 거쳐서 제품을 만드는 것보다 단공정으로 제품을 성형하는 것이 제품에 요구되는 까다로운 설계조건을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 그래서 위의 세가지 공정중에서 세 번째 공정이 제품이 요구하는 설계 조건을 만족하기 때문에 적절한 공정임을 알 수 있다.

5. 결 론

유한요소법을 이용한 금속성형 공정설계 및 예비성형체 설계를 위한 체계적이고 일반적인 설계방법론을 근거로 자동차용 냉방기 클러치로 사용되는 내부 풀리를 냉간 단조로 성형하기 위한 공정을 설계하였다. 제품이 요구하는 설계조건인 내·외부압출부의 길이가 동일한 형상과 내·외부 압출부의 균일한 경도분포, 등을 예측함으로써 발생 가능한 결함을 예측하여 결함을 제거할 수 있는 공정을 제시하였다. 일반적으로 단공정으로 제품 생산이 불가능한 것은 예비성형공정을 거쳐서 제품을 만들지만, 예비성형공정을 거치므로서 생길 수 있는 단가 상승 요인, 설계조건 불만족등의 문제점이 발생할 수 있다는 것을 알았다. 이런 경우에는 최종 제품의 형상을 변경시킴으로써 공정수를 줄일 수 있고, 제품에 요구되는 설계조건을 만족시킴을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

1. K. Sevenler, P. S. Raghupati, and T. Altan, "forming Sequence Design for Multistage Cold Forging", J. of Mech. Work. Tech., Vol. 14, pp. 121-135, 1987.
2. K. Osakada, T. Kado and G. B. Yang, "Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forging", Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 239-242, 1988.
3. P. Bariani, and W. Knight, "Computer-Aided Cold-Forging Process Design:A Knowledge Based System Approach to Forming Sequence Generation", Annals of the CIRP, Vol. 37, No.1, pp. 243-246, 1988.
4. 이진희, 강범수, 김병민, 이정환, "등속 조인트 하우징의 냉간단조 공정설계", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제9호, pp. 2234-2244, 1994.
5. J. J. Park, N. Rebelo, and S. Kobayashi, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 1, pp. 71-79, 1983.
6. S.M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231-243, 1986.
7. S.M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Plane-Strain Rolling by the Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 24, No. 4, pp.253-266, 1984.
8. B. S. Kang, N. S. Kim, and S. Kobayashi, "computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No. 1, pp. 43-52, 1990.
9. B. S. Kang and S. Kobayashi, "Preform Design in Ring Rolling Processes by the Three-Dimensional Finite Element Method", Int. J. Mach. Tools. Manu. Vol. 31, No. 1, pp. 139-151, 1991.
10. 김동진, 고대철, 김병민, 강범수, 최재찬, "신경망과 유한요소법을 이용한 단조품의 초기소재 결정", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.133-140, 1994.
11. 정낙면, 이낙규, 양동열, "축대칭 냉간단조의 유한요소해석에서 퍼지 로직을 이용한 전방투사법", 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 8, pp. 1468-1483, 1992.

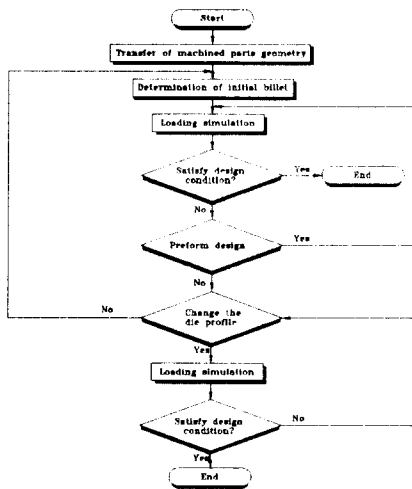


Fig. 1 The flow chart of processes planning for inner pulley

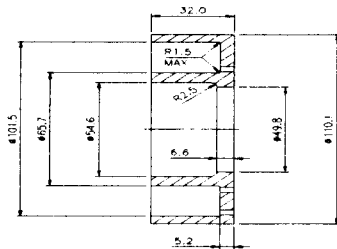


Fig. 2 Dimensions of machined inner pulley

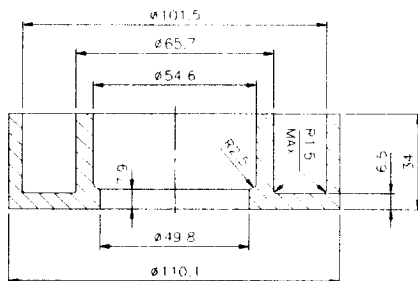


Fig. 3 Dimensions of forged inner pulley without outside flange

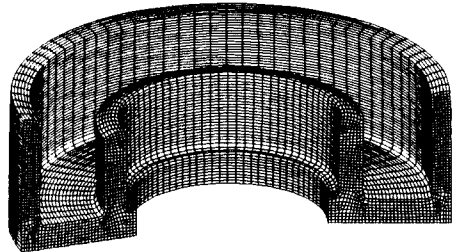


Fig. 4 The deformed shape of inner pulley ($\Phi 110$)

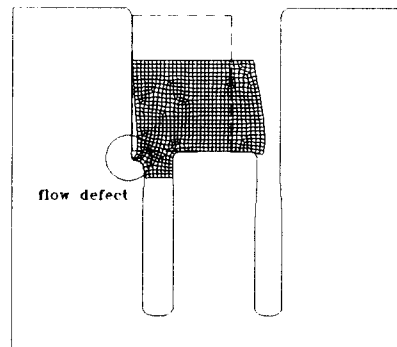


Fig. 5 The deformed shape and flow defect of inner pulley ($\Phi 90$)

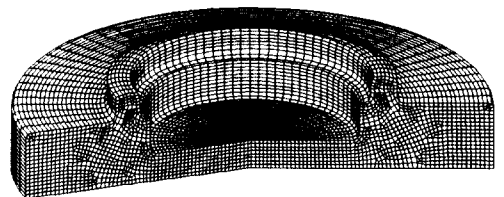


Fig. 6 The deformed shape of preform for inner pulley

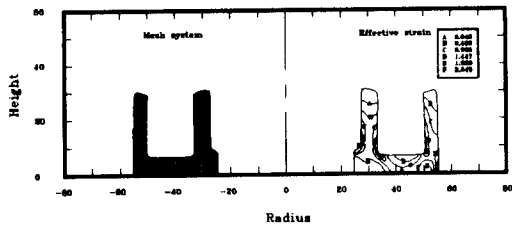


Fig. 7. The deformed shape and the distribution of effective strain for dual process with annealing

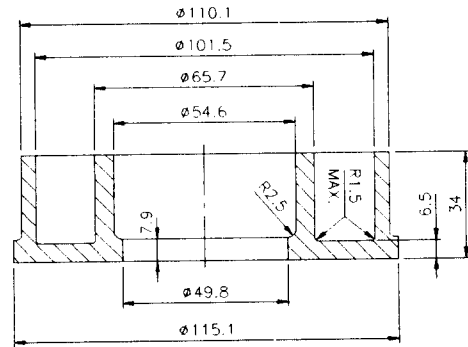


Fig. 10 Dimensions of forged inner pulley with outside flange

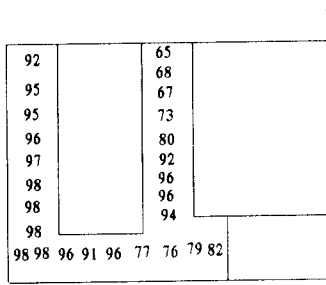


Fig. 8 The distribution of hardness for dual process

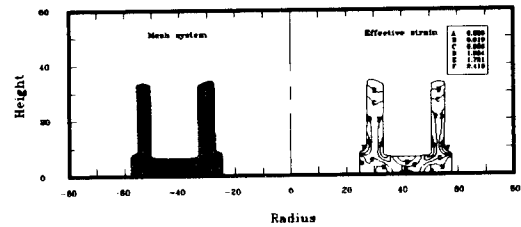


Fig. 11 The deformed shape and the distribution of effective strain for modified single process

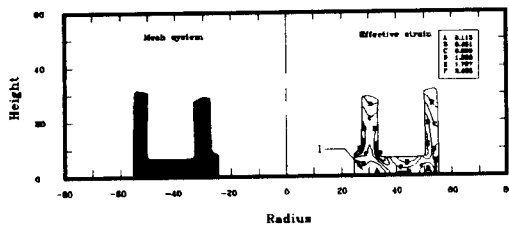


Fig. 9 The deformed shape and the distribution of effective strain for dual process without annealing

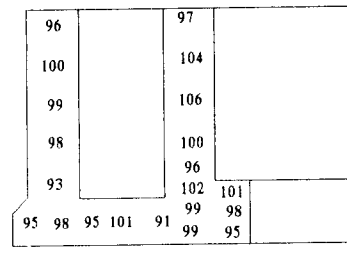


Fig. 12 The distribution of hardness for modified single process