

이중 리브를 가진 냉간 압출품의 내·외부 결함 방지를 위한 공정 설계

김동진* · 김병민**

(1999년 8월 6일 접수)

Process Design to Prevent Internal & External Defects of Cold Extruded Products with Double Ribs

D. J. Kim and B. M. Kim

Abstract

Internal and external defects of an inner pulley for automobile air conditioner are investigated in this study. Inner pulley is a part of compressor clutch assembly of automobile air conditioner. In cold forging of inner pulley, the design requirements are to keep the same height of the inner rib and outer one and to make uniform distribution of hardness in the forged product. At the end of the forging of inner pulley, the piping defect as an external defect begins to form at the back center of the billet. The internal crack as an internal defect also occurs at the adiabatic shear band which usually has maximum ductile fracture value. It is important to predict when the internal and external defects occur during the deformation process, in order to minimize the amount of discard that is generated. The finite element simulations are applied to analyze the defects. The validity of the computational results are examined by experiments. These computational results are in good agreement with the experimental ones.

Key Words : Ductile Fracture, Piping defect, Flow Control, Pulley, Double Ribs, Cold Extrusion

1. 서 론

냉간 압출 공정은 장비가 비교적 간단하고 제품의 강도와 표면 정도가 우수하며 후속적인 기계가공을 줄일 수 있으므로 고강도 부품과 치수가 작은 정밀부품 생산에 많이 적용되고 있다. 그러나 제품의 형상에 따른 소재의 변형이력, 성형공정 조건, 등에 따라 냉간 압출품에 결함이 발생할 수 있으며, 이는 제품의 단가 상승요인이 된다. 따라서

이러한 결함을 제품의 공정설계 초기에 예측하고 방지할 수 있는 것은 중요한 과제이며 소재의 질감 및 기계적 성질의 향상을 목적으로 많은 연구가 이루어지고 있는 정형가공에서도 필수적이다. 냉간 압출 공정설계의 목적은 결함 없는 제품을 최소의 비용으로 생산하는데 있다.

냉간 압출 중에 발생하는 대표적인 결함에는 소재 내부 또는 표면에 크랙이 발생하는 내부결함과 소재 끝 부분에 구멍이 생기는 파이프 결함(Piping defect)과 같은 외부

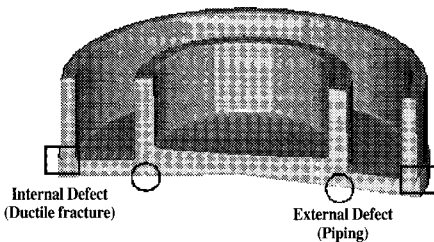
* 부산대학교 기계기술 연구소
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

결합이 있다.⁽¹⁾ 소재의 내부 결함은 연성 파괴나 단열 전단 밴드의 생성으로 발생하게 된다.⁽²⁻³⁾ 그리고 냉간 압출 시 외부 결함인 파이핑 결함은 컨테이너 내부에 남아있는 소재의 길이가 한계 길이보다 짧을 경우 편치와 접촉한 소재의 중심부에서 원추형 형상으로 발생된다.⁽⁴⁻⁵⁾

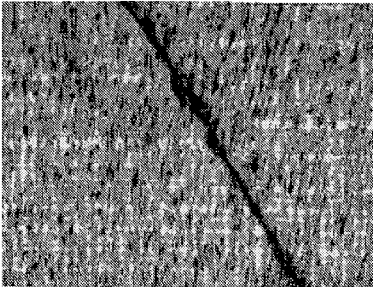
본 연구에서는 실제 냉간 압출 공정에서 내·외부 결함이 발생되어 문제가 되고 있는 이중 리브를 가진 자동차 냉방기 부품인 내부 풀리(Inner pulley)가 연구 대상이다. 중실소재를 초기소재로 한 기존의 방식⁽⁶⁾으로 냉간 압

출한 제품은 공정이 안정화되어 결함 발생이 극히 적었으나, 최종제품을 위한 과도한 기계가공량에 따른 소재 손실량이 많은 문제점이 지적되어 내부 풀리 제품의 압출품 형상을 수정하였다. 이렇게 수정된 형상으로 풀리를 냉간 압출한 결과, 소재 외경 단부에 미소 크랙의 발생과, 편치부와 접촉하고 있는 소재의 바닥부에 파이핑 결함과 유사한 유동 결함이 Fig. 1과 같이 발생하였다. 이러한 소재 외경 단부에 발생한 미소 크랙은 자동차 냉방기가 작동되는 동안 응력 집중으로 인한 강도의 저하가 예상되며, 소재 바닥부에 발생한 파이핑 결함도 후가공 후에도 제품의 바닥부에 존재하여 제품의 강도 및 수명이 현저히 감소할 것으로 판단되었다.

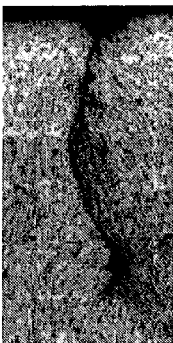
따라서 이러한 풀리의 내·외부 결함들의 발생원인과 방지대책이 요구됨에 따라 본 연구에서는 상용 강소성 유한요소 해석프로그램인 DEFORM⁽⁷⁾을 사용하여 성형공정 중에 발생하는 이러한 결함들을 해석하고, 결함들의 발생원인을 분석하여 이들 결과를 바탕으로 결함이 발생하지 않는 제품형상을 재설계한 다음, 실험과 비교, 검증하였다.



(a) Internal and external defects of extruded pulley



(b) Photograph of internal crack for extruded pulley



(c) Photograph of piping defect for extruded pulley

Fig. 1 Internal and external defects for inner pulley

2. 결함 발생 원인 및 유한 요소 해석

2.1 내부 결함 및 외부 결함 발생

풀리에 사용되는 재질은 AISI 1008이며 소재에 대해 압축실험을 하여 다음과 같은 응력-변형을 관계식을 얻었다.⁽⁶⁾ 소재와 금형 사이의 접촉면은 인산염 피막후 본드루베(Bond Lube) 윤활처리를 하였다. 링 압축 시험에 의한 윤활제의 마찰 상수값은 0.1이었다.

$$\bar{\sigma} = 677.38\bar{\epsilon}^{0.2186} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

풀리의 기계 가공용 도면은 Fig. 2과 같이 이중 리브를 가지는 형태이다. 풀리에 요구되는 설계조건은 첫째로 이중 리브 길이가 기계가공량을 고려한 길이만큼 길면서 동일해야 한다. 둘째로 풀리는 고속으로 회전하기 때문에 최종 압출품 이중 리브부의 경도는 동일 압출부 길이에 따라 균일하게 분포되어야 한다. 냉간 압출품의 경도 분포는 소재의 경도와 유효변형률 사이에 일정한 관계가 있음을 알 수 있는데⁽⁸⁻⁹⁾, 본 연구에서는 최종 제품에 대한 이중 리브부의 경도가 압출부의 위치에 따라 동일하고 균일한지를 판별하기 위하여 유한요소 해석결과인 유효 변형률 분포와 실험을 통하여 해석결과가 설계조건을 만족하는지 비교 분석하였다.

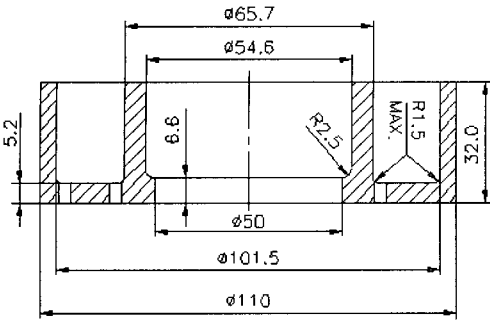


Fig. 2 Dimension of machined pulley

소재 중심부에 $\phi 50$ 의 내경부가 존재하는 중공형상 제품(Fig. 2)에 대하여, 이 내경부를 성형하는 방법으로는 첫 번째로 초기 소재를 피어싱하여 중공형 소재를 성형한 후, 이 소재로 압출하여 후가공을 없게 하는 방법과, 두 번째로 초기 소재에 내경부가 없는 중실형 소재로 압출한 후에 소재 중심부를 피어싱하여 내경부를 성형하는 방법이 있다. 중공형 소재는 소재 손실이 큰 단점이 있고, 이에 반해 중실형 소재는 압출한 후 최소의 두께만을 가진 내경부를 피어싱하기 때문에 중공형 소재보다 소재의 손실이 17% 정도 적게 소요된다. 그리고 중공형 소재에 비해 금형면에 작용하는 압력이 높아져서 금형의 수명이 다소 감소하지만, 금형 구조가 비교적 간단하여 실제 금형 제작비는 오히려 약 30% 정도 적게 소요되는 장점이 있다.⁽⁶⁾ 나아가 현장에서는 중실소재의 손실량을 더 줄이기 위하여 금형 외경부의 단을 직경으로 3 mm에서 1.5 mm로 변경하였다. 재설계된 중실소재로 풀리에 대한 압출을 수행한 결과 펀치와 접촉하고 있는 소재의 외경 단부에서 크랙에 의한 제품의 파손이 발생하였고, 소재의 외부 바닥면에 냉간 압출 압출공정에서 발생하는 파이핑 결함과 유사한 결함이 소재의 $\phi 60$ 이 되는 위치에서 발생하는 문제점이 발생하였다(Fig. 1). 이러한 결함들의 발생 원인은 일반적으로 소재의 과도한 변형에 의한 연성파괴와 소재의 유동 결함에 의한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾

따라서, 본 연구에서는 중실형 소재에서 외경 단부에 발생하는 연성파괴와 풀리 바닥면에 발생하는 파이핑 결함을 강소성 유한요소 해석으로 예측하고, 실제 압출시에 발생한 결함과 비교하였다. 해석한 결과와 실제의 결함이 일치하면 동일한 방법을 통하여 결함을 방지하는 풀리의 압출품 형상을 재설계하고, 설계된 압출품에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과를 검토하여 설계 조건을

만족하지 못하면 압출품 형상을 다시 변경하여 제품에 요구되는 설계 조건을 만족할 때까지 내·외부 결함이 없는 제품의 형상을 재설계하는 절차로 진행되었다.

2.2 내·외부 결함의 유한요소 해석

성형해석 동안 발생하는 소재 내부의 연성파괴 정도를 파악하기 위하여 식 (2)와 같은 연성파괴식을 사용하였다.⁽¹²⁾ 또한 DEFORM을 사용하여 T. Altan등⁽¹³⁾이 제안한 절점 추적 방법과 소재의 유동선으로부터 파이핑 결함을 해석하였다.

$$Fracture\ value = \int_0^{\epsilon_f} (\sigma^* / \sigma) d\epsilon \quad (2)$$

where σ^* is the tensile maximum principal stress

σ is the effective stress

$d\epsilon$ is the effective strain increment

ϵ_f is the fracture effective strain

초기 빌렛은 이전 연구⁽⁶⁾에서 설계한 공정 조건을 참고하여, 외경이 $\phi 110$, 높이 14.6 mm인 중실소재이고, 내·외부 압출부의 유동제어를 위한 단이 직경상으로 1.5 mm인 압출품으로 Fig. 3과 같이 재설계하였다. 이중 리브를 가지는 내부 풀리의 압출은 Fig. 4와 같은 전방압출 공정이다.

Fig. 5는 Fig. 3의 기계가공된 제품에 대한 압출 공정의 유한요소 해석결과로써, 내·외부 압출 리브부의 높이 차이는 2.35 mm로 작았고 압출부 길이도 40 mm 이상으로 압출되어 동일한 압출부의 길이를 만족하였다. 그러나 외경 단부의 연성파괴 값은 0.1685로 다른 부분에 비해 매우 높아 내부 크랙의 발생이 예측된다. 유효변형률 분포를 보면 외부에 비해 내부 리브부의 유효변형률 값이 크게 분포하는데, 이는 내부 압출부의 폭이 외부 압출부보다 크기 때문에 외부로의 유동보다는 내부 압출부로의 소재 유동

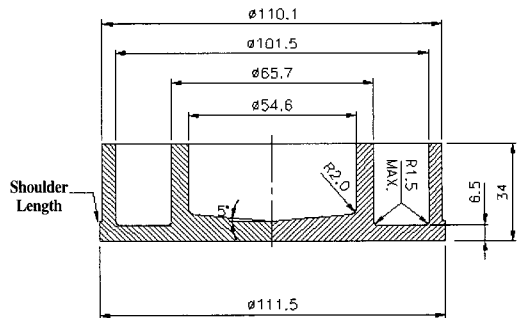


Fig. 3 Dimension of extruded pulley

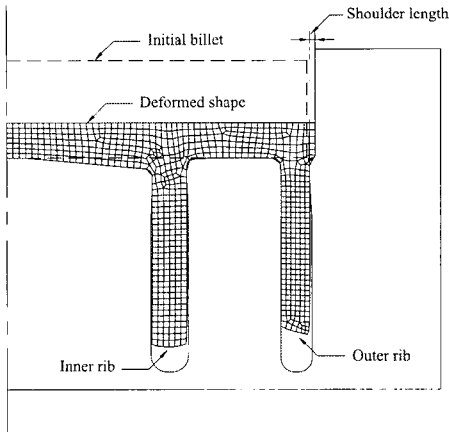


Fig. 4 Schematic diagram of forward extrusion for inner pulley

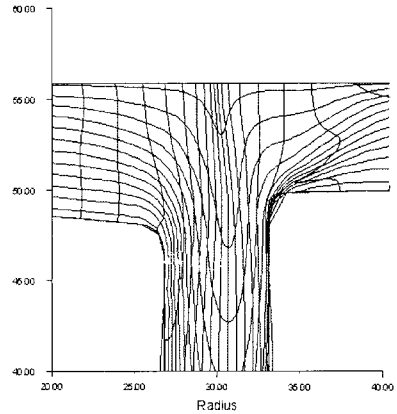


Fig. 6 Flow lines at part where piping defect can be occurred

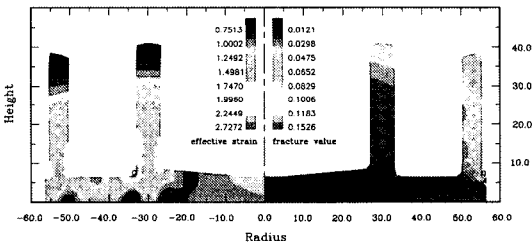


Fig. 5 Distribution of effective strain and ductile fracture value for extruded pulley with outside flange (Small boxes are maximum value : max. effective strain=3.0114, max. fracture value=0.1685)

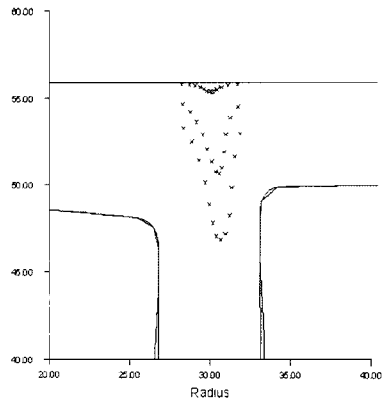


Fig. 7 Calculated displacement of the points, selected on the upper billet surface for extruded pulley illustrates the formations of a piping defect

이 많아져 더 큰 변형을 받은 것으로 생각된다. 이러한 결과로 파이핑 결함과 같은 외부 결함이 생긴다면, 외부보다는 내부 압출부에서 발생할 가능성이 높다.

Fig. 6의 소재 유동선을 관찰해보면 내부 압출부로의 소재유동이 급격하게 일어나서 파이핑 결함이 발생할 수 있는 가능성을 알 수가 있었다. 파이핑 결함을 보다 확실하게 예측하기 위하여 초기빌렛의 상부 표면에 세 개의 옆로 38개의 절점을 선택하여 각 절점을 추적하였다. 최종상태에서 각 절점의 유동형상을 보면 실제 압출품에서 발생한 $\phi 60$ 지점의 절점들이 Fig. 7과 같이 내경 리브쪽으로 급격히 유동하면서 동시에 펀치 바닥면의 소재가 내부로 유동하여 파이핑 결함의 유발 원인이 됨을 알 수 있다.

연성과파괴 값 및 절점 추적 결과를 풀리의 압출품에서 발생한 내·외부 결함과 비교한 결과, 소재 내·외부 결함의 발생 위치가 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 연성과파괴에 의한 내부 결함과 외부 결함인 파이핑 결함을 방지할 수 있는 압출품 형상을 재설계하여 유한요소 해석 및 실험을 다시 수행하였다.

3. 내·외부 결합 방식을 위한 압출품 설계 및 실험

본 연구에서는 이중 리브를 가진 풀리의 결함을 방지하기 위해 과도한 변형의 원인이 되는 내부 결함은 소재의

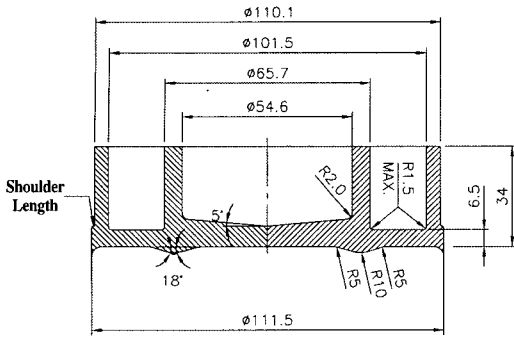


Fig. 8 Dimensions of the modified pulley for preventing defects

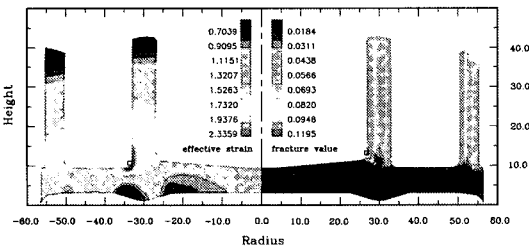


Fig. 9 Distribution of effective strain and ductile fracture value for extruded pulley for preventive defects (small boxes are maximum value : max. effective strain=2.5800, max. fracture value=0.1319)

외경 단부와 접촉하고 있는 편치에 곡률을 부여함으로써 소재의 일부가 이 부분으로 유동할 수 있도록 하여 변형의 집중 정도를 완화하고, 다음으로 제품의 외부 결함인 파이핑 결함을 방지하기 위해서는 Oh⁽¹¹⁾가 제안한 오목하게 들어간 형상의 편치로 성형하는 방법을 채택하여 오목한 형상 주위가 18° 각도로 처리된 압출품을 Fig. 8와 같이 재설계하였다. 외경 단부는 변경된 치수를 그대로 사용하여 이전 압출품 체적과 거의 변화가 없는 동일한 압출품 체적으로 하였다.

Fig. 9은 내·외부 결함 방지를 위하여 설계한 압출품 형상에 대한 성형 해석한 결과로 유효변형률 분포 및 연성 파괴 값을 나타내고 있다. 내·외부 압출부의 높이 차는 2.43 mm로 감소하였고, 압출부길이도 40 mm 이상으로 압출되어 제품의 요구조건을 만족하였다. 유효변형률 분포를 Fig. 5와 비교해보면 거의 유사하게 분포하여 내부 크랙 및 파이핑 결함방지를 위해 사용한 편치는 소재의 변형

에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그리고 연성 파괴 값도 최대값이 0.1319로 Fig. 5의 경우보다 작았고, 그 위치도 약간 이동하였으며, 재설계된 이전 형상에서 최대 연성파괴 값을 가지는 위치에서의 값은 0.0287으로 매우 낮아졌음을 알 수 있었다. 외경 단부의 편치면에 곡률을 준 것이 소재의 변형집중을 완화시켜 이 단부에서의 연성 파괴 값이 매우 낮아졌음을 알 수 있었다.

다음으로 소재의 유동선을 비교하였다. 편치접촉부의 소재가 오목한 편치 내로 유동하여 내부 압출부로의 소재 유동이 Fig. 5의 결과와는 달리 작게 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 편치의 오목한 부분으로의 소재유동은 작았으나 평편치로 성형한 소재 유동보다는 큰 차이를 나타내었다. 즉 Fig. 10에서 오목한 편치로 풀리를 성형한 것이 내부 압출부로의 소재유동에 큰 영향을 미침을 알 수 있었고, 소재 유동 중의 절점 추적은 Fig. 11와 같다. 유동선과 마찬가지로 소재의 절점들이 오목한 편치형상 내부로 유동하여 파이핑 결함은 발생하지 않을 것으로 생각된다. 결함방지를 위하여 편치바닥면을 오목한 형상으로 풀리를 성형하여도 내·외부 압출부 길이 및 변형 정도에는 크게 영향을 미치지 않았다. 그러나 절점 추적 결과 편치바닥면이 평평한 것과 차이가 있었으며, 평편치 형상의 경우에는 소재 바닥 면의 절점들이 내부 압출부로 급속히 유동하였지만, 오목한 형상의 경우에는 이와는 반대로 각 절점들이 오목한 부위로 이동하고 있음을 관찰할 수 있었다.

유한요소 해석결과를 근거로 하여 편치의 외경부에 곡률을 주고, 또한 편치 면을 오목한 형상으로 수정하여 압출 실험을 실시하였다. 압출실험은 2,500 ton 너클 조인트

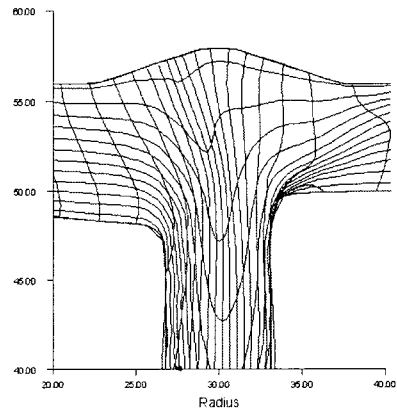


Fig. 10 Flow lines extruded pulley for preventive piping defect

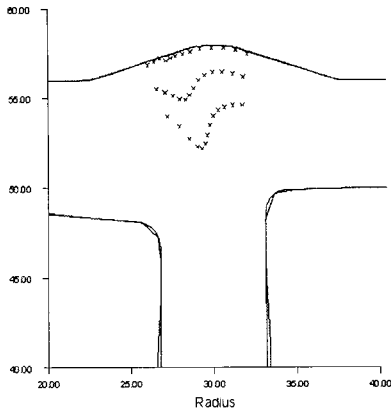


Fig. 11 Calculated displacement of the points, selected on the upper billet surface for extruded pulley, illustrates the formations of none piping defect

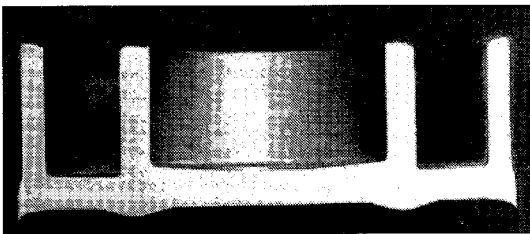


Fig. 12 Photograph for extruded pulley for preventive piping defects

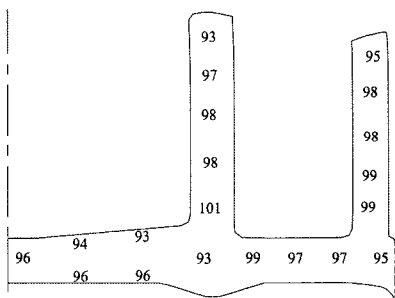


Fig. 13 The distribution of hardness(HrB) for extruded pulley for preventing defects

프레스에서 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 압출품을 절단하여 내부 크랙의 발생 및 파이핑 결함의 발생 유무를 관찰한 결과 내부 크랙 및 파이핑 결함은

없었다. 그리고 동일한 내·외부 압출부 길이를 얻을 수 있었고, 이중 리브의 동일한 압출 위치에서 동일한 경도 분포를 얻을 수 있어, 재설계된 압출품도 제품에 요구되는 설계 조건을 만족시키는 것을 알 수 있었다(Fig. 13).

4. 결과 및 고찰

내·외부 결합을 방지하기 위하여 설계한 압출품 형상으로 성형해석 및 압출실험을 수행한 결과 연성파괴에 의한 크랙과 같은 내부 결함 및 소재의 유동 이상으로 생긴 파이핑 결함과 같은 외부 결함이 없고, 압출부의 경도가 균일하고 내·외부 압출부 길이가 거의 동일하면서 설계 조건을 만족하는 압출품을 얻을 수 있었다. 성형하중은 평편치가 1.454 ton이었고 오목한 형상의 편치가 1.467 ton으로 약간 상승하였다. 편치 외경부의 곡률부와 편치 중심부의 오목한 부로 소재가 유동하여 성형하중이 증가한 것으로 생각된다. 내·외부 압출부 길이의 차는 평편치의 경우 1.33 mm이었고, 오목한 편치의 경우에는 1.2 mm의 차이를 보여 내·외부 압출부 길이의 차이도 거의 없었다. 그러나 유한요소 해석결과에서는 각각 2.35 mm, 2.43 mm로 실험과는 차이를 보였다. 압출부 유동제어를 위한 금형 외경부의 단에서 많은 수의 격자재구성으로 인한 체적 감소로 실험값과 해석값이 차이가 생긴 것으로 생각된다.

소재의 유동을 분석해보면 먼저 편치 외경부에 곡률은 소재의 변형 집중을 상당히 완화시킨 것을 알 수 있다. 소재가 외경부의 곡률부분과 외부 압출부로 전·후방 동시 압출과 같은 형태로 동시에 변형하여, 외경 단부에서의 연성파괴값이 곡률이 없는 경우에 비해 많이 낮아졌고, 또한 최대 연성파괴값의 위치도 변경되었다. 다음으로 내부 압출부로의 소재 유동도 분석해 보면 평편치로 성형한 형상보다도 오목한 편치로 성형한 형상의 압출품이 균일하였고, 소재 중심부의 내부 압출부로의 소재유동도 평편치로 성형한 형상보다 급격하지 않는 결과를 얻었다. 즉 오목한 편치를 사용함으로써 소재가 먼저 오목한 편치의 내부로 유동된 후 내부압출부로 유동하여 평편치를 사용한 경우보다 소재의 유동이 균일하였다. 그리고 오목한 편치를 사용하여 풀리를 성형할 경우 내부압출부 길이 성형에는 크게 영향을 미치지 않았다. 결과적으로 평편치 대신에 오목한 형상의 편치를 사용하여 풀리를 성형할 경우 소재의 유동에는 크게 영향을 주지 않고 파이핑 결함을 방지할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

마지막으로 최종 압출품의 경도를 측정한 결과 Fig. 13

와 같이 외부 압출부의 경도는 HrB 95~99로 비교적 균일하였고, 내부 압출부의 경도도 HrB 93~101로 균일함을 알 수 있었다. 그리고 각 압출부 길이에 따른 경도 분포도 동일하게 나왔으며, 이전 연구의 경도 분포와 비교하여도 크게 차이가 없음을 알 수 있었다.⁶⁾ 따라서 수정된 압출품의 형상은 제품의 치수와 강도에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그리고 재설계된 펀치로 제품을 생산할 경우 이전의 펀치에 비해서, 형상이 변경된 부분의 마멸량이 다소 증가하였다. 그러나 펀치의 마멸량 증가로 인한 제품의 치수 변화는 후가공인 기계가공에서 제거될 부분으로 제품에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 따라서 펀치의 재설계로 인한 펀치의 수명은 거의 변화가 없을 것으로 생각된다. 또한 제품의 재설계로 인하여 기계 가공량이 약 1 mm 정도 증가하였고, 가공시간도 늘어났다. 그러나 제품의 재설계로 인한 내·외부 결합 방지 효과를 전체적으로 고려해 보면 제품의 생산 원가는 감소하였다. 따라서, 내·외부 결합 방지를 위한 재설계는 제품뿐 아니라, 펀치의 수명, 생산 원가 절감 측면에서도 우수한 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강소성 유한요소 해석을 이용하여 자동차 냉방기용 클러치로 사용되는 이중 원통형 폴리의 내·외부 결합을 해석하였다. 해석 결과를 이용하여 내부 크랙 및 파이핑 결함의 발생 원인을 밝혔고, 이것을 근거로 하여 결함을 방지할 수 있는 압출품의 형상을 설계하였다. 재설계된 압출품의 유한요소 해석 결과와 압출 실험을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 중실형 소재로 이중 원통형 폴리를 성형할 때 발생하는 내부 크랙 발생을 연성 파괴값으로 그리고 파이핑 결함은 절점 추적을 통하여 예측한 결과 실험과 잘 일치하였다.
- (2) 중실형 소재로 이중 원통형 폴리를 성형할 때 발생하는 내부 크랙 및 파이핑 결함을 소재의 유동 조절을 통하여 방지할 수 있는 압출품 형상을 재설계하였다.
- (3) 연성 파괴에 의한 내부 결함은 소재의 집중 변형을 완화해 줄 수 있는 형상으로 변경하고, 유동 결함에 의한 파이핑 결함의 경우에도 소재의 변형 속도를 완화해 줄 수 있는 형상으로 변경함으로써 제품이 결함을 방지할 수 있었다.
- (4) 내부 크랙 및 파이핑 결함을 방지할 수 있는 압출품 형상은 결함이 발생되던 기존의 제품에 비해 체적변화, 압출하중 및 가공시간 등이 거의 동일하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) T. Okamoto, T. Fukuda and H. Hagita, 1997, "Material Fracture in Cold Forging -Systematic-Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging", Source Book on Cold Forming, ASTM, pp. 216~226.
- (2) A.S. Wifi, A. Abdel-Hamid, N. El-Abbasi, 1998, "Computer-aided Evaluation of Workability in Bulk Forming Processes", J. Mat. Proc. Tech., No.77, pp. 285~293.
- (3) Batra RC, Nechitailo NV, 1997, "Analysis of Failure Modes in Impulsively Loaded Pre-notched Steel Plates", International Journal of Plasticity, Vol.13, No.4, pp. 291~308.
- (4) C. E. Pearson and R. N. Parkins, 1960, The Extrusion of Metals, John Wiley & Sons, Inc., New York
- (5) S. I. Oh, W. T. Wu, J. P. Tang, and A. Vedhanayagam, 1991, "Capabilities and Applications of FEM code DEFORM : The perspectives of the developer", J. Mater. Process. Technol., vol.27, pp. 25~42.
- (6) 정덕진, 김동진, 김병민, 1997, "중실소재를 이용한 자동차 냉방기용 폴리의 냉간단조 공정 설계", 한국소성가공학회지, 제6권, 제4호, pp. 23~33.
- (7) "DEFORM User's Manual V4.1", 1995, Scientific Forming Technologies Corporation
- (8) M. Kobayashi, M. Li and H. Sakuta, 1990, "Prediction of Mechanical Properties and Micro-structures in Forged 1050 Aluminum by Numerical Simulation", Light Metals(in Japanese), Vol.40-11, pp. 805~810.
- (9) T. Altan, K. Sweeney, V. Vazquez, H. Kim, M. Knoerr, 1995, "Cold Forging of Complex Shaped Parts to Close Tolerance-application of Metal Flow Simulation to Process and Tool

Design", Proc. 9th International Cold Forging Congress, Solihull, UK

- (10) 고대철, 1998, "An Integrated Methodology to Predict Material Flow and Ductile Fracture by the Finite Element Method and its Applications to Metal Forming Processes", 부산대학교 대학원 박사학위논문.
- (11) 오세욱, 1995, "축대칭 전방압출공정의 파이핑 결함에 관한 유한요소해석", 부산대학교 대학원 석사학위논문.
- (12) J. Petruska, L. Janicek, 1998, "Computationally-experimental workability determination of compressed cylindrical specimen with surface defect", J. Mater. Process. Technol., vol.80-81 pp. 572~578.
- (13) T. Altan and M. Knoerr, 1992, "Application of the 2D finite element method to simulation of cold-forging processes", J. Mater. Process. Technol., vol.35 pp. 275~302.