

기어블랭크 단조공정의 비교해석 및 공정설계

최호준* · 허성창* · 장동환* · 황병복**

(1998년 11월 13일 접수)

A Comparative Analysis and Process Design among the Gear Blank Forging Processes

Ho-Joon Choi, Sung-Chang Hur, Dong-Hwan Chang and Beong-Bok Hwang

Abstract

Cold forging is a special type of forging process in which metal is forced to flow plastically under compressive force into a variety of shapes in room temperature. Gear blank, which is produced by cold forging, is concerned with the production method of transmission gear. Based on the results of simulation of the current four-stage process, the gear blank forging process for improving the conventional process sequence is designed. The rigid plastic finite element analysis was applied to new gear blank forging processes. The new process consists of three stage operations with one annealing treatment after first operation. Based on the results of simulation of the proposed process, a required equipment could be selected. The new designed process appears to be more economical in producing the gear blank.

Key Words : Cold Forging, Forging Process, Gear Blank, Rigid-Plastic FEM

1. 서 론

냉간단조(cold forging)는 금속재료가 주로 압축응력 하에서 소성변형 하여 다양한 형상으로 변화되는 단조공정의 한 분류이고 다이, 프레스설계, 다이재료의 향상으로 인하여 최근 매우 많이 사용되는 가공 방법이다. 냉간단조에 의한 성형은 비교적 높은 치수정밀도와 최종부품의 부드러운 표면과 더불어 재료의 기계가공에 의한 낭비를 막고 기계적성질의 향상을 가져온다.⁽¹⁻³⁾ 냉간단조와 냉간압출(cold extrusion)은 종종 같은 의미로서 사용되기도 하며 대표적인 성형공정으로 압출, 업셋팅 또는 헤딩, 코이닝, 아이어닝(ironing)과 스웨이징(swaging) 등을 들 수

있다. 기어블랭크⁽⁴⁾와 같이 단순한 형상의 빌렛이나 슬러 그로부터 시작하여 비교적 복잡한 형상의 최종생산품을 생산하기 위하여 일반적으로 여러 가지 성형단계를 거치게 된다. 온간단조에서, 빌렛은 유동응력과 단조압력을 낮추기 위하여 가열되는 반면 냉간단조에서는 변형이 시작될 때 상온이고 성형하중이 매우 높다. 성형하중과 응력의 예측은 공정결정, 예비성형체 설계(preform design), 다이설계 및 공정조건과 장비선정 등에 있어서 매우 중요하며 부품의 성형성뿐만 아니라 경도분포를 결정하는 변형률분포 또한 중요하다.⁽⁵⁾ 단조부품의 성형은 한 번의 공정으로 최종부품을 생산할 수 없는 경우가 많고 공정 중 크랙이나 내부결함이 없는 성형공정을 설계하기란 쉽지 않

* 인하대학교 자동화공학과 대학원

** 인하대학교 자동화공학과

다. 따라서 이러한 결함을 없애고 시행착오를 줄이기 위하여 이론적인 해석을 통하여 보다 개선된 공정을 설계하는 것이 필요하다.

전통적으로 성형공정은 실무자의 풍부한 경험과 비용이 많이 드는 시행 착오에 의하여 결정되고, 이러한 전통적인 공정설계 방법은 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션에 의한 설계 방식으로 전환되어 가는 것이 최근의 추세이다.⁽⁶⁻⁸⁾ 컴퓨터를 이용한 공정설계의 대표적인 방법으로 수치해석적 방법을 들 수 있다. 유한요소법(FEM)이나 상계요소법(UBET) 등이 이에 속하며, 최근 들어 유한요소법을 이용하여 단조부품에 대한 예비성형체 설계와 공정설계에 관한 연구가 활발하게 진행되었다. Kobayashi와 Lee⁽⁹⁾에 의해 소성가공의 이론적 해석이 제안된 이후 Lange와 Du⁽¹⁰⁾는 축대칭 부품들의 가공공정을 설계하는 방법을 소개하였다. 이 방법은 완성된 부품의 형상에서 비교적 간단한 초기의 형상을 유추해 내는 것이다. 또 다른 공정설계의 예로서 Al-Sened⁽¹¹⁾ 등은 헤드포밍공정을 유한요소법으로 해석하여 4개의 가공단계에 대한 최적의 형상과 치수를 구하였으며 Hwang⁽¹²⁾ 등은 기존의 유한요소법이 안고 있는 접촉문제를 개선하기 위하여 벌칙강소성 유한요소법을 개발하여 다양한 종류의 해석 및 설계문제에 성공적으로 적용하였다.

본 논문에서는 기존의 기어블랭크를 성형하는 두 가지 방법에 대하여 강소성유한요소법을 이용하여 해석하였다. 그리고 이것을 바탕으로 새로운 기어블랭크의 공정설계를 하였다. 기존의 4단계로 이루어져 있는 두 가지 공정에 대하여 변형률과 하중, 금형의 압력분포를 구하였고 두 개의 방법을 서로 비교하여 새로운 공정을 설계하는데 기초 자료로서 사용하였으며 이를 기초로 3단계로 이루어진 새로운 기어블랭크 성형공정을 설계하였다.

2. 해석방법 및 기존공정

2.1 해석방법

기어블랭크의 재질은 AISI 5120 강재를 사용하였다. 참고문헌에 의하면 일반 금속의 냉간 단조의 경우 인산화 비누 윤활제 또는 오일로 완전 윤활할 때 마찰값의 범위가 0.05~0.15이므로 다이와 소재에 작용하는 일정단마찰(constant shear friction)을 가정하여 마찰계수(friction coefficient)값을 전공정에 대하여 0.1로 가정하였다.⁽⁵⁾ 주된 가공이 상온에서의 냉간압출 공정이므로 재료의 유동 응력과 변형률의 관계는 다음의 식으로 표현하였다.⁽¹³⁾

$$\bar{\sigma} = (872.9) \bar{\epsilon}^{0.18} [\text{Mpa}], \bar{\epsilon} < 0.7 \quad (1)$$

그리고,

$$\bar{\sigma} = 818.4 [\text{Mpa}], \bar{\epsilon} \geq 0.7 \quad (2)$$

기어블랭크의 해석방법으로는 유한요소법이 적용되며 특히 성형과정 중 탄성변형이 소성변형에 비해 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성유한요소법(rigid-plastic finite element method)을 사용한다.⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾ 소재는 등방성경화의 성질을 지니고 있다고 가정하고 이러한 가정들이 해의 정확도에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고 있다.⁽¹⁵⁾

2.2 기존의 성형공정

기어블랭크는 냉간단조로 가공되며, 주로 자동차의 트랜스미션에 사용되는 것으로서 여러 가지 방법으로 만들어진다. 트랜스미션 기어블랭크는 다단형 정밀 냉간단조 공법, 완전 밀폐단조, 냉간회전단조 등으로 만들어지며 일반적으로 다단형 정밀 냉간단조 공법이 많이 사용되고 있다.⁽¹⁶⁾ 또한 기어블랭크의 머리 부분은 베벨기어를 만들기 위한 부분으로 정밀단조(precision forging)에 의해 가공되며 충분한 강성이 요구되는 부분이다.⁽¹⁷⁻¹⁸⁾

Fig. 1은 본 논문의 해석대상인 기어블랭크를 나타내고 있으며 Fig. 2는 기존 기어블랭크의 초기빌렛의 형상과 성형공정을 나타내고 있다.

기어블랭크의 성형은 Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼 방법 1(Fig. 2의 위)과 방법 2(Fig. 2의 아래)의 두 가지 성형방법에 의해 생산되며 방법 1은 각 단계마다 싱글다이 프레스를 이용하는 성형방법이고 방법 2는 완전 자동화된

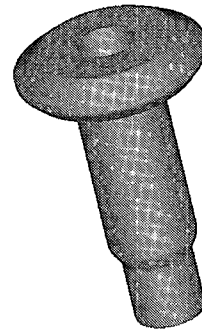


Fig. 1 Blank for a transmission gear

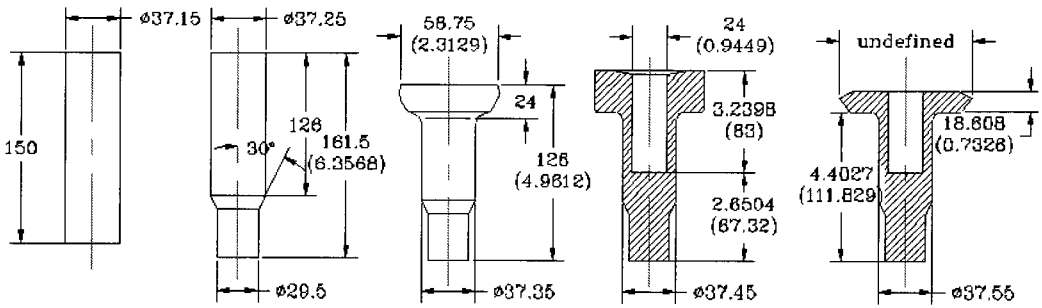
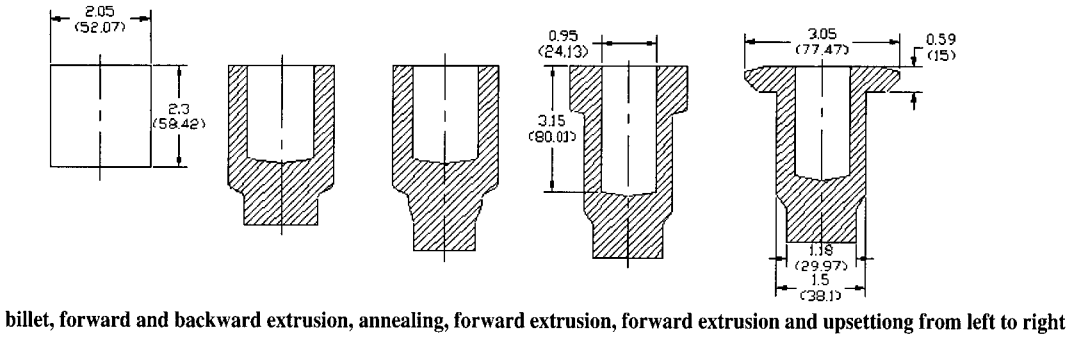


Fig. 2 Initial billets and process sequences for conventional process 1(above) and the process 2(below)

트랜스퍼 헤더에서 성형하는 방법으로 프레스 제작사에 의해 후에 제안되었다.⁽¹⁹⁾ 두 성형방법은 모두 4단계의 공정으로 이루어지며 방법 1은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 전방과 후방압출, 전방압출, 전방압출, 업셋팅으로 공정이 진행되고 방법 2는 전방압출, 업셋팅, 후방압출, 업셋팅 순으로 가공이 된다. 각각의 성형조건은 Table 1에 상세히 요약되어 있다. 방법 1에서는 기어블랭크의 샹크(shank)를 만들기 위하여 세 번째 공정에서 전방압출 하는 동안 변형이 크기 때문에 횡방향 크랙을 피하고 소재에 연성을 되찾아 주기 위하여 첫 번째 공정 후에 풀림처리를 한다.⁽¹⁹⁾ 방법 2의 성형공정은 초기 빌렛의 직경이 방법 1의 빌렛 직경보다 작기 때문에 초기빌렛을 가공하는데 드는 비용이 방법 1의 경우에 비하여 65% 정도로 줄일 수 있으며 기계프레스에서 일괄적으로 생산할 수 있기 때문에 대량생산에 적합하다고 할 수 있다.⁽¹⁹⁾ 또한 방법 2는 초기 빌렛 바깥지름이 샹크 바깥지름과 같으며, 초기 두 공정의 하중보다도 세 번째와 네 번째 공정에서 심한 변형에 의하여 하중이 공정 중 최대하중에 근접하므로 온도가

300에서 480°F로 상승한다.⁽¹⁹⁾

Table 1 Forming conditions for each step in conventional processes

Method 1		
	Operation	Forming Conditions
1st step	Backward Extrusion	R = 21.15% (r=1.27)
	Forward Extrusion	R = 39.34%
2nd step	Forward Extrusion	R = 45.6%
3rd step	Forward	R = 59.4% (r=2.46)
4th step	Upsetting	s = 45.1%

Method 2		
	Operation	Forming conditions
1st step	Forward Extrusion	R = 20.5% (r=1.59)
2nd step	Upsetting	s = 59.25%
3rd step	Cup Extrusion	R = 58.93% (r=1.70)
4th step	Upsetting	s = 47.92%

r=extrusion ration(R=Reduction in Area%) s=UpsetRatio(%)

3. 기존 기어블랭크 제작공정의 해석

유한요소해석을 통하여 시뮬레이션을 한 결과 소재의 유동 및 펀치의 행정거리와 하중간의 관계, 다이압분포 등에 관한 자료를 얻었으며, 관련자료를 통하여 해석기준에 관한 여러 가지 정보를 얻었다. Fig. 3~Fig. 10은 각 공정에서의 변형과 변형률분포, 행정-하중의 관계, 그리고 다이압분포 등을 보여주고 있다.

3.1 기존 단조공정 1(방법 1)

Fig. 3은 방법1에서 행하여지는 냉간압출공정에 대한 시뮬레이션의 초기상태와 격자구성 그리고 시뮬레이션이 완료된 후 소재내의 유효변형률 분포와 다이압 분포를 나타낸다. 방법1의 첫 번째 공정은 전방 및 후방압출이 동시에 이루어진다. 특히 후방압출을 통하여 기어블랭크의 전체 윤곽을 형성시키는 역할을 하며 다음 공정에서 빌렛을 중공축 형상으로 가공하는 전방압출을 수행하기 위하여 펀치로 빌렛의 중심부를 가압하여 중공축으로 만드는 공정이다. 후방압출에 있어서 캐비티 최대 높이와 펀치 지름의 비가 약 2.1로서 전문가가 제시한 한계인 3을 초과하지 않는다.⁽²⁰⁾ 단면감소율은 탄소강에서 최대면적감소율의 한계를 70~75%로 보고 있어, 첫 번째 공정의 면적감소율은 46.5%이므로 안정적으로 전후방압출을 행할 수 있다.⁽²⁰⁾ 유효변형률은 최대 약 2.5까지의 분포를 보이고 있다. 주로 펀치의 벽면을 따라 변형이 일어나고 있어 가공경화가 펀치의 벽면을 따라 집중적으로 발생하고 있음을 보여준다. Fig. 3의 오른쪽 그림은 첫 번째 공정의 완성 단계에서의 변형률의 분포와 함께 다이압의 분포를 나타낸 것이다. 펀치의 아래 단에서 가장 큰 압력을 받고 있음을 알 수 있으며 다이의 벽면을 따라서 거의 일정한 압력이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4는 첫 번째 공정의 하중-행정 관계를 나타낸다. 지름 52.07 mm, 높이 58.42 mm인 초기 빌렛을 사용한 공정의 최대하중과 소요에너지는 2404kN과 58.48kJ이다. 이 공정의 펀치 길이는 50.8 mm이고 펀치 직경은 24.13 mm로 펀치길이대 직경비가 2.105, 펀치에 작용하는 압축응력과 압출비, 최대하중 등을 고려할 때 전문가에 의해 제시된 한계영역내에 존재하므로 펀치에는 좌굴이 발생하지 않을 것으로 판단된다.⁽¹⁹⁾

Fig. 5는 두 번째 공정의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 전방압출과정으로서 기어블랭크의 안내역할을 하는 하단부를 성형하는 공정으로 첫 번째 공정 후 횡방향 크랙

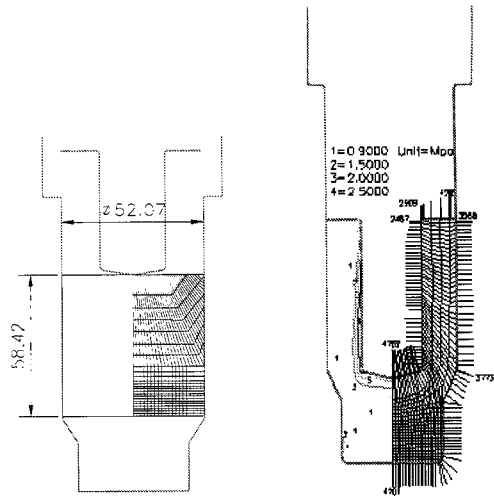


Fig. 3 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 1 (method 1)

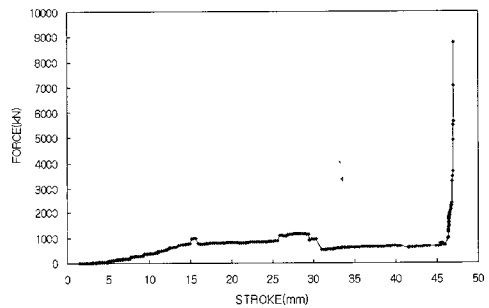


Fig. 4 Load-stroke relationship for step 1 (method 1)

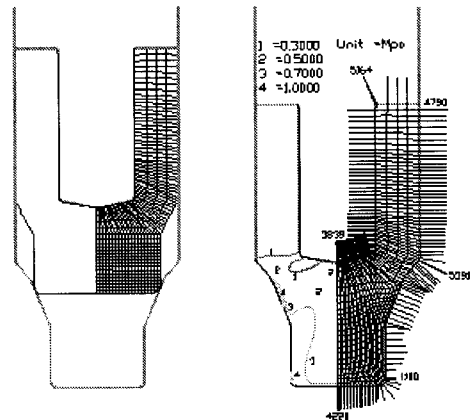


Fig. 5 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 2 (method 1)

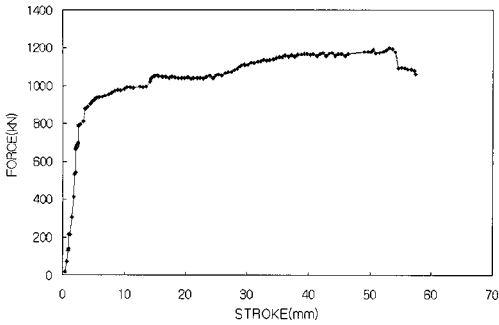


Fig. 6 Load-stroke relationship for step 2 (method 1)

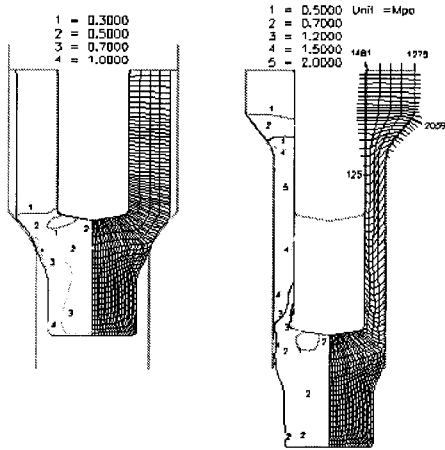


Fig. 7 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 3 (method 1)

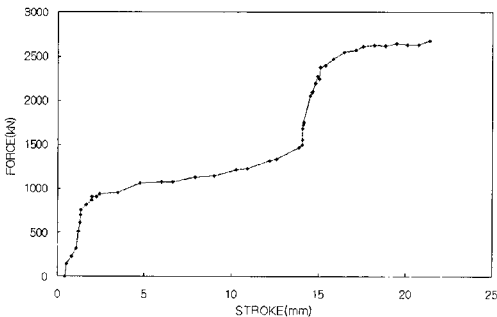


Fig. 8 Load-stroke relationship for step 3 (method 1)

을 피하고 연성을 부여하기 위하여 풀림처리를 하였기 때문에 새로운 격자를 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다.

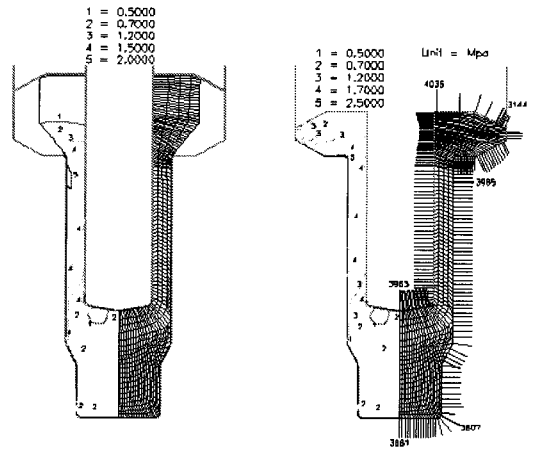


Fig. 9 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 4 (method 1)

최대 유효변형률은 약 1까지의 값을 보이며 아랫단의 변형부에 전반적으로 골고루 분포한다. 다이압은 펀치 하단부와 다이 하단 부에 가장 크게 발생한다.

Fig. 6은 두 번째 공정의 하중-행정 관계를 나타내며, 공정 중 최대하중은 3010.09kN, 소요에너지는 약 78kJ이다. 공정 중 하중은 전방압축이 진행되는 동안 계속 증가하고 공정이 끝나는 부분에서 격자의 모든 경계점이 다이에 닿을 때 급격한 증가를 보이고 있다.

Fig. 7은 세 번째 공정의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 두께를 줄여서 생크를 만드는 작업으로 다음 공정의 업셋팅을 위한 머리부분의 예비성형도 이루어진다. 최대 유효변형률은 약 2까지의 값을 가지며 변형이 주로 이루어지는 벽면전체에 분포함을 알 수 있다. 다이압은 전 단계에 비하여 비교적 작은 값을 나타내고 있다.

Fig. 8은 세 번째 공정의 하중-행정 관계를 나타낸다. 펀치가 약 3 mm 하강했을 때 다이 하단 부의 경사면을 따라 소재가 유동을 시작한다. 이때 급격히 하중이 증가하며 이후로는 꾸준히 상승하고, 업셋팅을 위한 예비성형인 상단 부를 형성시킬 때 또다시 하중이 급격히 증가한다. 이 공정의 최대하중은 2672.90kN, 공정 중 소요에너지는 약 33.58kJ이다.

Fig. 9는 마지막 공정인 업셋팅 공정으로 베벨기어의 이가 될 부분을 성형시키는 작업의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 공정은 정형가공을 위해서 반드시 필요한 공정으로서 베벨기어를 만들기 위하여 꼭 필요한 공정이다. 그림에서 보는바와 같이 소재의 상단부에 큰 유효변형률의

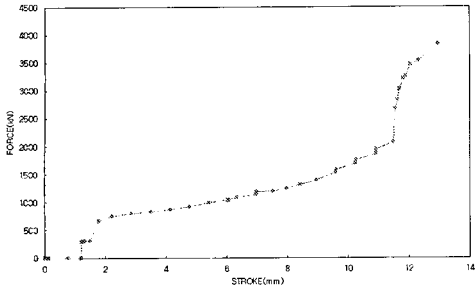


Fig. 10 Load-stroke relationship for step 4 (method 1)

분포를 보이며 최대 2.5까지의 값을 갖는다. 다이압은 펀치의 하단 부, 펀치가 끝나는 상단 부의 단진 부분, 그리고 다이의 상단 부에서 높게 나타난다.

Fig. 10은 마지막 공정의 하중-행정 관계를 나타낸다. 하중은 소재의 상단부가 펀치에 밀리며 다이의 상단 부에 접촉하면서부터 빠르게 증가하며 경계점들이 펀치와 다이에 완전히 접촉함에 따라 최대하중을 나타내게 된다. 공정 중 최대하중은 6335.94kN, 소요에너지는 23.35kJ이다.

3.2 기존 단조공정 2(방법 2)

Fig. 11은 방법 2에서의 첫 번째 공정인 전방압출공정으로서 좌측은 빌렛을 나타내고 우측은 첫 번째 공정이 끝난 후의 소재의 변형과 변형률 분포, 다이에 가해지는 압력 등에 관한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 첫 번째 공정은 이후 공정 중에 안내역할을 하는 소재의 하단 부를 성형하기 위한 공정이며 최대 유효변형률은 약 1이다. 다이압분포는 그림에서 볼 수 있듯이 비교적 일정하며, 전체적으로 가공되는 부분이 적기 때문에 소재내의 유효변형률의 차이는 크게 나타나지 않았다.

공정 최대 하중과 성형에너지는 각각 2195kN과 13.79kJ이며, 그림에서(Fig. 12) 볼 수 있듯이 행정이 27 mm부근에서 하중이 급격히 증가하며 이는 소재가 상금형과 하금형에 모두 접촉하여 금형이 닫히면서 발생하는 현상이다. 이 공정의 단면감소율은 20.5%로 전문가에 의해 제시된 한계를 넘지 않는다. 특히 본 공정에서와 같이 소재가 다이벽면을 따라 다이의 안쪽에서만 유동이 일어나는 경우에는 그 한계 단면감소율이 70~75%에 이르므로 안전한 압출공정을 이룰 수 있다.⁽²⁰⁾

Fig. 13은 두 번째 공정인 업셋팅 공정의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 변형은 상단 부에 집중되며 소재의 지름과 업셋팅 길이의 비는 1.58로 전문가에 의해 제시된

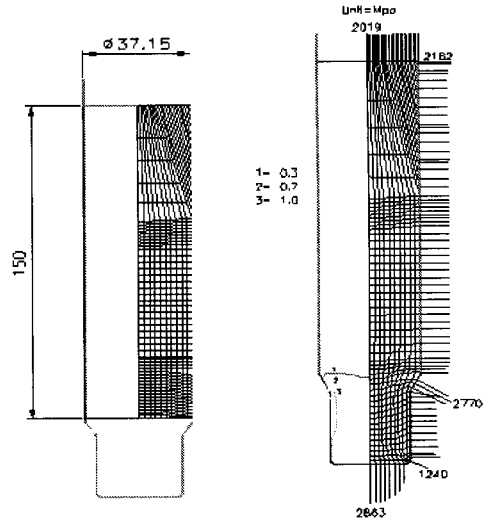


Fig. 11 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 1 (method 2)

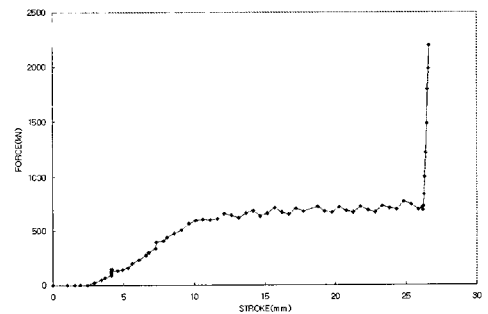


Fig. 12 Load-stroke relationship for step 1 (method 2)

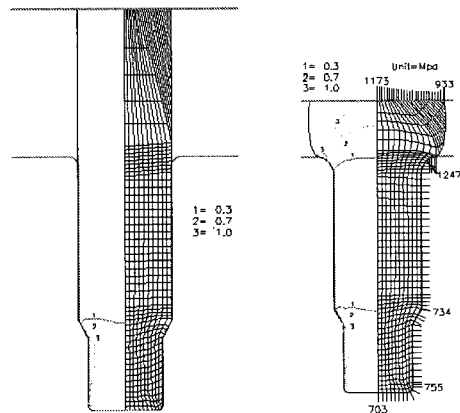


Fig. 13 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 2 (method 2)

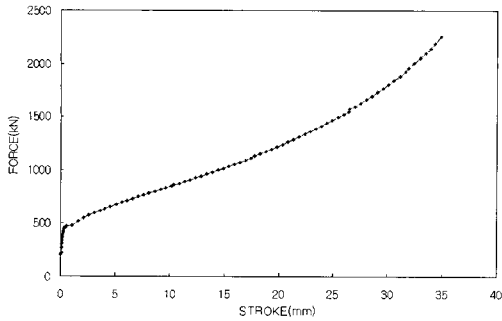


Fig. 14 Load-stroke relationships for step 2 (method 2)

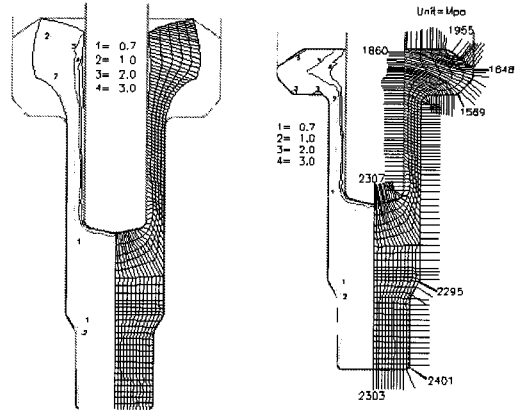


Fig. 17 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 4 (method 2)

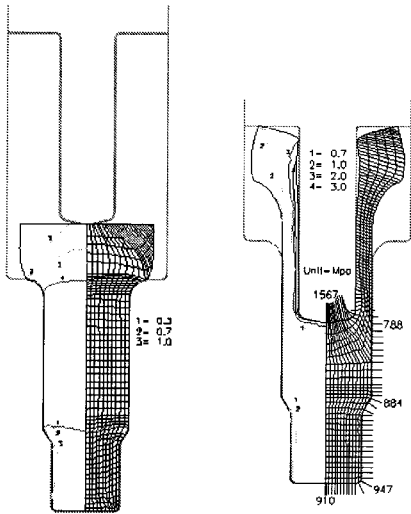


Fig. 15 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 3 (method 2)

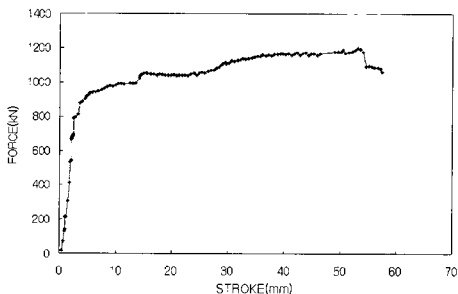


Fig. 16 Load-stroke relationships for step 3 (method 2)

한계영역을 초과하지 않는다.⁽²⁰⁾ 업셋팅 량이 클 경우 원주방향에 크랙이 발생할 수도 있으나 이 공정에서의 유효

변형률 값이 1정도이고 편차 값이 비교적 작기 때문에 이러한 문제점은 없다고 볼 수 있다.

Fig. 14는 두 번째 공정의 하중-행정 관계를 나타낸 것이다. 행정이 진행되면서 하중이 첫 번째 공정과는 달리 완만하게 일정한 비율로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 공정에서의 최대하중은 2254.76kN이고 소요에너지는 41.81kJ이다.

Fig. 15는 세 번째 공정인 후방압출공정의 시뮬레이션 결과이다. 후방압출공정에서는 1차 업셋팅이 끝난 소재를 후방압출가공을 하는 단계이다. 변형률은 편치벽면을 따라 크고 고르게 나타난다. 편치직경대 길이의 비가 3.5로서 압출비 1.56과 소재의 중공축부분의 안지름, 바깥지름을 고려하여 좌굴 가능성을 판단하였을 때, 전문가에 의해 제시된 한계영역내에 존재하므로 좌굴은 발생하지 않는 것으로 판단된다.⁽¹⁹⁾ 편치에 작용하는 압력은 편치의 중심에서 노우즈(nose)와 랜드(land)부분이 이어지는 부분에서 큰 값을 갖고, 편치벽면에는 다이압이 거의 작용하지 않는다. 또한 하급형에 작용하는 다이압도 편치에 작용하는 압력의 반정도임을 알 수 있다.

Fig. 16은 세 번째 공정의 하중-행정 관계를 나타낸 것으로, 행정초기에 하중이 급격히 증가하다가 공정이 끝날 때까지 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 이 공정에서의 최대하중은 1201.05kN이고 소요에너지는 60.27kJ로 하중은 다른 공정에 비하여 작으나 행정거리가 크기 때문에 소요된 에너지는 크게 나타났다.

Fig. 17은 방법 2의 마지막 공정으로서 소재의 머리 부분을 완성시키는 업셋팅 공정의 시뮬레이션 결과를 보여

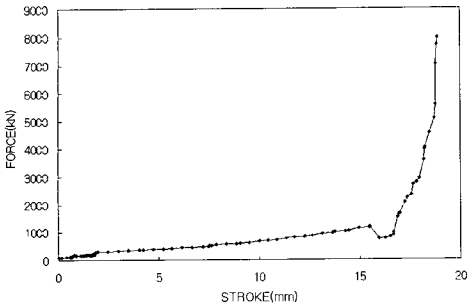


Fig. 18 Load-stroke relationships for step 4 (method 2)

준다. 그림에서 유효변형률은 최대 약 3까지의 값을 보이며, 특히 상단부 업셋팅부위에 많은 변형이 있었음을 알 수 있다. 다이압은 다이의 하단부, 상단부와의 경계면에 테이퍼부분과 펀치의 하단부 끝면, 하단부와 상단부의 단지는 부분에서 크게 발생하며 이러한 부분들은 다이나 펀치의 마모가 심하므로 삽입 가능하도록 금형을 제작하여 공정중에 발생할 수 있는 고장에 미리 대비하여야 한다.

Fig. 18은 마지막 공정의 하중-행정 관계를 나타낸다. 성형하중은 행정의 끝에서 급격히 증가하며, 공정의 최대 하중은 7964.67kN이고 소요된 에너지는 17.56kJ이다.

4. 새로운 공정설계

4.1 설계시 고려사항 및 제안된 공정

공정의 설계는 필요한 공정의 결정, 금형 설계, 초기 소재 선정, 공정조건 및 장비의 선택과 같이 많은 분야를 포함하고 있다. 냉간단조로 생산되는 부품은 다단계 성형공

Table 2 Forming conditions for each step in proposed processes

Proposed process		
	Operation	Forming conditions
1st step	Forward & backward	R = 65.00%
	Extrusion	R = 23.16%
2nd step	Forward extrusion	R = 57.23%
3rd step	Upsetting	s = 31.15%

r=extrusion ratio(R = Reduction in Area(%)) s = Upset Ratio(%)

정을 거치는 것이 일반적이기 때문에 설계과정에서 맨 처음 고려해야할 사항으로 초기빌렛의 선정이 매우 중요하다. 기존의 전통적인 제작방법에서 방법 1은 초기빌렛의 직경이 상대적으로 크기 때문에 첫 번째와 두 번째 공정을 거치면서 매우 큰 단면감소율을 갖는다. 방법 2에서는 초기빌렛의 직경과 기어블랭크의 생크 바깥지름이 같으나 세 번째 공정에서 펀치의 길이가 커서 좌굴의 가능성이 있을 수 있다. 베벨기어의 머리 부분을 완성시키는 마지막공정에서 상대적으로 행정이 커지고 매우 큰 하중이 발생하였다. 따라서 제안된 새로운 공정에서는 방법 1보다 직경을 작게 하고 후방압출 하는 과정에서 펀치의 직경 대 길이 비를 작게 하였으며 이러한 과정에서 공정을 줄일 수 있었다.

위에서 언급한 사항을 고려하여 Fig. 19와 같이 기어블랭크의 새로운 제조공정을 제안하였으며, Table 2에는 제안된 공정의 성형조건을 나타내었다. 첫 번째 공정은 전방과 후방압출이 같이 발생하며 공정 중 안내역할을 하는 기어블랭크의 하단 부를 성형하고 후방압출에 의해 생크 부

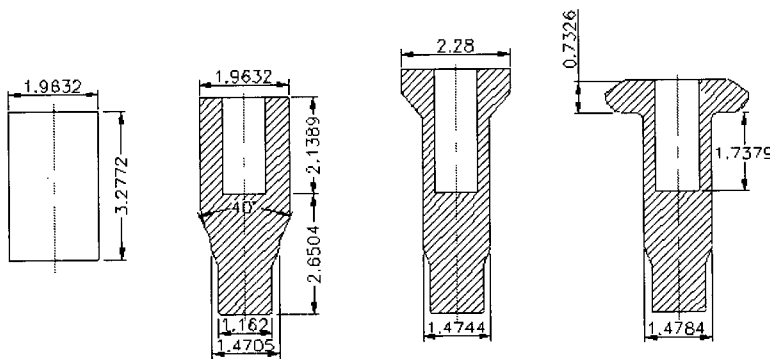


Fig. 19 Initial billets and process sequence for the proposed process with annealing after first operation (billet, forward & backward extrusion, forward extrusion and upsetting from left to right)

분을 중공형태로 가공하여 풀림 처리한다. 두 번째 공정은 전방압출로 기어블랭크의 생크부분을 만들고, 세 번째 공정에서 엷셋팅공정에 의해 기어블랭크의 머리부분을 완성하며 전체 공정이 마무리된다.

Fig. 19에서 생크의 중공축 부분은 첫 번째 공정과 두 번째 공정을 거치면서 좌굴의 가능성이 있다. 일반적으로 좌굴의 경우 중실축보다 중공축이 더 안전하기 때문에, 중실축에 대한 좌굴공식을 적용하여 좌굴의 영향을 판단하였다.⁽²¹⁾

압축응력상태 하에서 안정성 이론에 따르면 소성영역에서 중실봉의 좌굴식은 다음과 같다.⁽²¹⁾

$$\frac{1}{r} = \pi \sqrt{\frac{E_p}{\sigma_{cr}}}, \quad E_p = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (3)$$

여기서, l 은 봉의 길이, r 은 봉의 반경, E_p 는 접선계수(tangent modulus), σ 은 인장강도이다. 세장비(Slenderness ratio) l/r 이 3.30으로 위 식에 의해 얻어진 4.68보다 작아 안전하다고 볼 수 있다.

4.2 제안된 공정의 해석

기어블랭크의 성형공정으로 새롭게 제안된 공정은 세 번의 공정을 거치면서 제작되고 단계별로 해석한 결과는 다음과 같다.

제안된 공정의 초기빌렛은 외경 49.86mm, 길이 83.24 mm이고 Fig. 20에서 볼 수 있듯이 밀폐형 금형을 사용하여 성형된다. Fig. 20은 제안된 공정 중 첫 번째 공정을 나타낸다. 기어블랭크의 하단과 생크부분을 중공형상으로 가공하기 위하여 전방압출과 후방압출 공정이 동시에 진행되는 밀폐단조(closed-die forging)이다. Fig. 20의 좌측은 초기빌렛의 격자구성과 공정의 시작을 나타내고 우측은 공정이 완료된 후의 소재 변형과 유효변형률 분포, 다이압 분포를 나타내고 있다. 그림에서 초기 격자 구조는 이전의 해석방법과 마찬가지로 임의로 구성된 격자를 사용하였으며, 우측은 이전의 해석방법과 달리 요소망 재구성시 자동으로 격자들이 생성되게 하여 공정이 진행된 후 새로운 요소망을 구성한 후의 격자들의 모양을 나타내고 있다. 트랩다이(trapped-die)의 경우 압출각은 단면감소율에 따라 다르며 1단에서의 단면감소율은 44%로 압출각과 단면감소율과의 관계를 고려하여 압출각을 40°로 하였으며 2단의 압출각은 30°이다.⁽²⁰⁾ 전방압출의 단면감소율은 65%로 탄소강에 대하여 제시된 최대 70~75%, 최소 20~25% 사이의 값을 갖는다.⁽²⁰⁾ 후방압출의

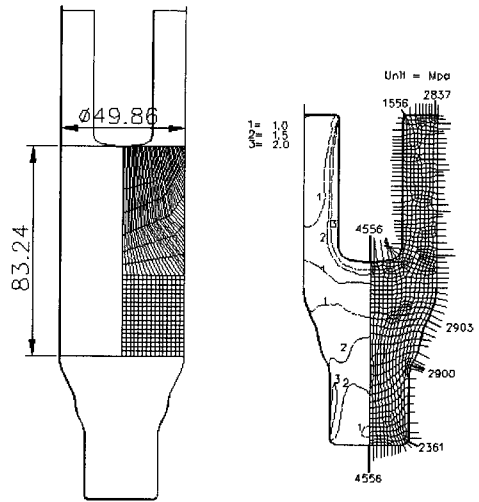


Fig. 20 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions step 1 in the proposed process

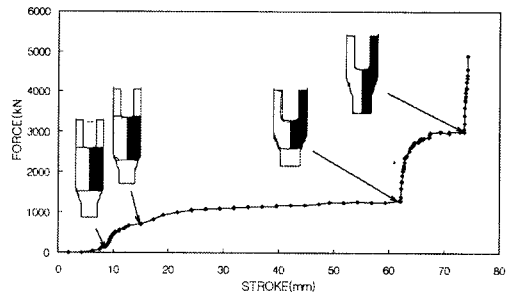


Fig. 21 Load-stroke relationships for step 1 in the proposed process

단면감소율은 23.16%이어서 크지 않은 값이다. 펀치의 직경대 길이비는 2.66으로 전문가에 의해 제시된 한계⁽¹⁹⁾를 초과하지 않아 좌굴의 가능성은 없으며 2단 압출에 의해 가공된다. 유효변형률은 변형이 큰 다이 벽면을 따라 크게 발생하며, 펀치벽면과 기어블랭크 하단에서 최대변형률이 나타난다. 금형에 작용하는 압력은 펀치 상단과 기어블랭크 하단에서 최대값이 발생하였으며 금형의 단진 부분과 상금형과 접하는 부분에서 크게 나타나고 있다. 공정 중 최대하중은 4911.72kN이고, 행정거리는 74.216 mm, 소요에너지는 92.71kJ, 최대 다이압은 4555.9MPa이다.

Fig. 21은 첫 번째 공정의 하중-행정관계를 나타낸다. 행정 8 mm에서 소재가 전방압출 되면서 첫 번째 단으로 재료

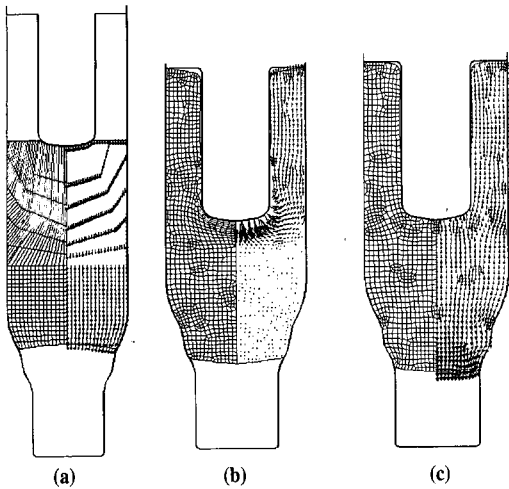


Fig. 22 Velocity fields at stroke 15.06 mm, 62.15 mm, 73.55 mm for step 1 in the proposed process

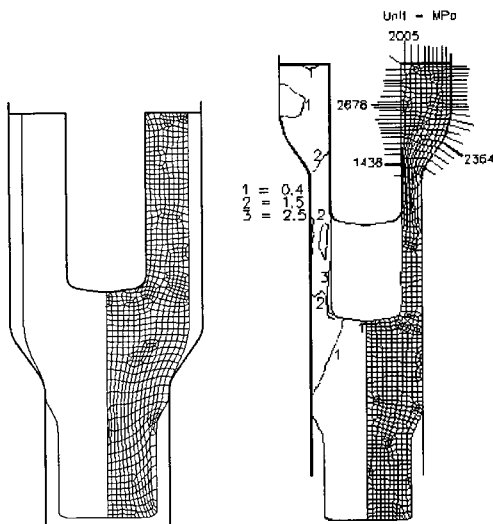


Fig. 23 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 2 in the proposed process

가 유입되는 과정 중 하중이 급격히 증가한다. 소재가 두 번째 단으로 유입되기 전에 후방압출이 시작되며 행정 62 mm 부근까지 진행된다. 후방압출이 끝나기 전에 전방압출이 다시 시작되며 소재가 두 번째 단으로 유입하는 과정에서 하중은 다시 급격히 증가한다. 공정이 끝난 후에 하중이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 상금형과 하금형이 닫히고 소재가 채워지면서 발생하는 현상으로, 실제 공

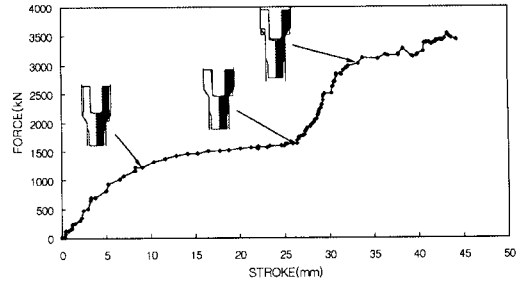


Fig. 24 Load-stroke relationships for step 2 in the proposed process

정중에 발생하는 최대 하중은 약 3408.206kN(347.4tonf)로 볼 수 있다..

Fig. 22는 Fig. 21에서 나타난 현상과 소재의 유동현상을 설명하기 위해 행정 15.06 mm, 62.15 mm, 73.55 mm에서 속도장을 나타내었다. 행정 15.06 mm인 경우 (a) 소재가 하단으로 유입되면서 속도는 다이 벽면을 따라 크게 나타나고 펀치의 하강속도보다 크며 소재하단 중심부는 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 따라서 소재 하단의 현상이 역베렐(reverse barrel)현상이 발생하였다 (Fig. 22(a)). 행정 62.15 mm에서는(Fig. 22(b)) 소재가 두 번째 단으로 유입되지 않고 재료의 유동이 후방으로 향하는 현상을 보여주며 전방으로 속도는 거의 없고 소재의 속도가 펀치의 반대쪽으로 향하고 있음을 보여주고 있다. 반면에 행정 73.55 mm에서는(Fig. 22(c)) 후방압출이 끝나면서 다시 소재의 흐름이 전방으로 향하는 것을 속도장을 통하여 볼 수 있다.

Fig. 23은 기어블랭크 성형공정 중 두 번째 공정의 성형 전후를 나타낸 것으로 소재의 유동이 크기 때문에 첫 번째 공정 후에 연성을 부여하기 위하여 풀림 처리하였다. 이 공정은 기어블랭크의 생크부분을 성형하고 업셋팅 작업을 좀 더 쉽게 하기 위함이며 하금형이 개방된 형태의 전방압출 공정이다. Fig. 23의 좌측은 공정의 시작을 나타내고 우측은 공정이 끝난 후의 소재변형과 유효변형률, 다이압 분포를 나타낸다. 전방압출시 단면감소율은 57.13%이고 유효변형률은 기어블랭크 중공부에서 2.5로 큰 값이 보이며, 생크부분은 0.4~2.0까지 나타난다. 다이압은 펀치 벽면에서 최대값이 나타났으며 다이의 단진 부분에서 크게 나타났다. 이 공정은 개방단조로서 펀치와 다이가 맞물려 있는 곳을 제외하면 압력은 거의 작용하지 않는다. 두 번째 공정에서 주의해야 할 사항은 펀치가

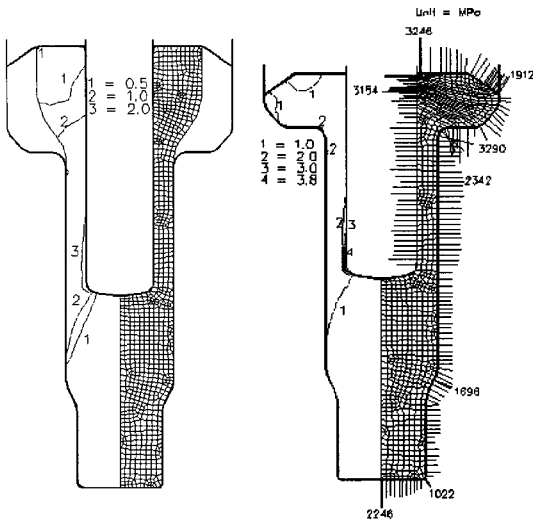


Fig. 25 Deformation patterns, effective strain and die pressure distributions for step 3 in the proposed process

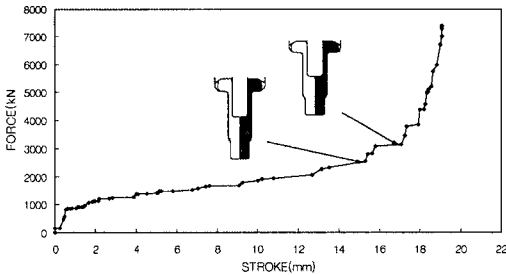


Fig. 26 Load-stroke relationships for step 3 in the proposed process

소재에서 떨어지기 전에 다이의 단진 부분이 펀치보다 위에 위치하여야 한다. 즉, 다이가 펀치 아래에 위치하면 재료의 유동이 펀치와 소재의 빈 공간으로 발생하기 때문에 안정적 가공이 불가능하다. 공정 중 최대하중은 3535.25 kN이고, 행정거리는 44.03 mm, 소비된 에너지는 85.12 kJ, 최대 다이압은 2677.77 MPa 이다.

Fig. 24는 두 번째 공정의 하중과 행정의 관계를 나타낸다. 공정이 시작되면서 증가하던 하중은 행정 10 mm 부근에서부터 일정하게 유지되고 펀치와 하금형 사이의 공간으로 소재의 유동이 많아져 소재가 펀치와 다이에 접촉하면서 하중이 증가하기 시작한다. 펀치와 소재가 떨어지면서 하중은 증가하지 않고 완만하게 진행된다.

Fig. 25는 베벨기어의 이가 될 부분을 성형하는 공정이며 제안된 성형공정의 마지막 공정으로 업셋팅에 의해 성형되는 밀폐단조공이다. 공정의 시작과 다이셋팅을 그림의 좌측에 나타내었고 우측에 공정이 끝난 후의 소재변형과 유효변형률 분포, 다이압 분포를 나타내었다. 유효변형률은 앞 공정과 마찬가지로 펀치의 리드부분에서 크게 나타났고, 최대유효변형률은 3.8로 공정 중 최대가 되었다. 따라서 가공경화가 펀치의 리드부분과 기어블랭크가 맞닿아 있는 면에 집중됨을 알 수 있다. 다이압은 기어블랭크의 생크부분과 머리부분이 만나는 곳에서 가장 크게 나타났고, 이와 맞은편 펀치의 다이압도 크게 나타났다. 따라서 성형하는 동안 기어블랭크의 목부분에 압력이 가장 크게 걸리므로 금형을 설계할 때 유의해야 할 것이다. 업셋팅 공정 중 최대하중은 6691.77kN으로 제안된 공정 중 최대로 나타났으며, 행정거리는 19.07 mm, 소비에너지는 39.09kJ, 최대 다이압은 3289.54MPa 이다.

Fig. 26은 마지막 공정의 하중과 행정의 관계를 나타낸다. 전체적인 소재의 유동이 펀치의 움직임과 직교방향으로 흐르기 때문에 초기에 소재의 유동이 시작하기까지 큰 값의 하중을 필요로 한다. 따라서 초기에 행정 1mm에서 1000kN에 가까운 하중이 필요했으며 그 이상의 하중에서 재료의 유동이 시작되었다. 행정 15.3 mm까지 하중이 서서히 증가하다가 그 이후에 하금형의 단진 부분에 소재가 닿으면서 하중이 다시 증가하였으며, 행정 17.2 mm에서 상금형과 하금형이 단릴 때까지 급격히 하중이 증가하였다.

4.3 시뮬레이션 결과

본 연구에서 고려하는 금형은 온간단조 및 열간단조의 보다는 가혹한 하중조건에서 사용됨으로 금형의 손상이 우려된다. 그러므로 금형설계시 단조하중과 압력을 예측하는 것이 매우 중요하다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 다이압을 구하여 금형설계시 참고자료가 될 수 있도록 하였다.

제안된 기어블랭크 성형공정은 기존의 성형공정이 4단계에 걸쳐 가공이 되는데 비하여, 새롭게 제안된 3단계 가공 공정으로 기어블랭크를 제작할 수 있도록 하였다. 제안된 성형공정의 최대 유효변형률 분포는 세 가지 공정 모두 유사하다. 최대하중은 기존의 방법 1보다는 크나 방법 2보다는 작게 나왔다. 제안된 공정은 방법 2에 비해 첫 번째 공정후 풀림처리를 하고 이에 따라 두 번째 공정전에 다이와 소재간에 재윤활이 필요하여 전체적인 공정시간면에서는 비효율적이라 할 수 있다. 생크부분의 성형과 원활

Table 3 The comparison data among proposed process and conventional ones

Process Comparison	Method 1	Method 2	Proposed process
Machine	separate machine equipment	fully automatic	separate machine
Operation	4	4	3
Max. load(kN)	6335.94	7964.19	6691.77
Press capacity(ton)	-	1400	-
Effective strain distribution	similar		
Process time	long	short	medium
Billet sawing cost	high	low	medium
Annealing	after second operation	no	after first operation
Machine cost	medium	high	low
Maintenance	medium	high	low

한 업셋팅 작업을 위해 풀림처리를 하기 때문에 방법 1과 마찬가지로 제안된 공정 역시 펀치 벽면을 따라 연성파괴의 결합 가능성도 있을 수 있다. 하지만 방법 1과 제안된 성형공정은 기어블랭크의 제작이 각각의 기계에서 제작되고 방법 2의 경우 트랜스퍼 헤더를 사용하여 제작된다. 따라서 기어블랭크의 제작시간면에서 방법 2가 방법 1과 제안된 성형공정에 비하여 유리하다고 할 수도 있으나, 고가의 장비를 사용하기 때문에 대량생산을 요하거나 규모가 큰 업체가 아니면 장비를 구축하기 힘들다. 제안된 공정은 기존의 방법 1보다 공정이 줄어 제품의 제작시간을 줄이고 금형의 수를 줄일 수 있어 장비 및 제품 제작비를 줄일 수 있을 것으로 본다. 초기빌렛의 가공비는 방법 2가 기어블랭크의 생크지름과 빌렛의 생크지름이 같아 지름이 가장 적어 매우 유리하며 방법 1의 경우 빌렛직경이 가장 크기 때문에 가공비가 크다. Table 3에 기존의 성형공정과 제안된 공정의 시뮬레이션 결과를 정리하여 나타내었다.

5. 결 론

기어블랭크의 제작에 사용되는 성형공정을 기존의 성형공정과 제안된 성형공정에 대하여 시뮬레이션을 행하였으며 제안된 공정의 적합성을 판단하였다. 세 가지의 공정을 시뮬레이션 하여 얻은 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

(1) 4단계로 이루어진 기존의 두 가지 성형공정의 시뮬레이션을 통해 3단계의 공정으로 이루어진 새로운 성형공정을 설계하였다.

(2) 유효변형률의 크기나 분포는 두 공정 모두 펀치의 벽면을 따라 커다란 분포를 보인다. 그러므로 냉간압출 작업에 의한 가공경화는 기어블랭크의 안쪽 면에 집중됨을 알 수 있다.

(3) 전공정에 걸쳐서 최대펀치하중이 방법 2보다는 작아 펀치의 수명 면에서 보다 유리할 것으로 본다.

(4) 기존의 4단계를 거쳐 생산되던 기어블랭크의 제작을 제안된 공정에서는 3단계로 줄어들었기 때문에 금형을 줄일 수 있어 금형 비와 장비의 가격, 장비유지비 등을 줄일 수 있을 것으로 본다.

(5) 전통적인 생산방식 중 비슷한 장비를 사용하는 방법 1에 비하여 초기 빌렛 가공 비, 공정 수, 제작시간, 금형 비, 유지비 면에서 유리하다. 따라서 기어블랭크의 제작방법으로서 적합하다고 본다.

이상과 같은 결과들은 향후 모델재료를 사용한 실험에 의하여 검증할 예정이다.

후 기

본 논문은 인하대학교의 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) The Engineering Committee Division II, Small Products Industrial Fasteners Institute, 1984, "Cold formed parts yield impressive cost benefits", Manufacturing Eng., pp. 43-48.
- (2) Thoma J. Drozda, 1983, "Money saving innovations in automatic forming", Manufacturing Eng., pp. 32-39.
- (3) Nada Shojiro, 1984, "Accurately forged parts by modern super-multistage parts former", Metal-working Eng. Marketing, pp. 98-100.
- (4) Sagemuller, F., 1968, "Cold Impact Extrusion of Large Formed Parts", Wire, No. 95, p. 2.
- (5) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford Uni. Press, pp. 39-41.

- (6) S. K. Biswas and W. A. Knight, 1974, "Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies", Proc. 15th Int. MTDR Conf., p. 135.
- (7) N. Akgerman and T. Altan, 1972, "Recent Developments in Computer-Aided Design of Firing Process", SME Technical Paper, No. 72-110.
- (8) G. B. Yu and T. A. Dean, 1985, "A practical Computer-aided approach to mould design for axisymmetric forging die cavities", Int. J. March. Tool Des. Res., Vol. 25, p. 1.
- (9) C. H. Lee and S. Kobayashi, 1973, "New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method", J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 95, p. 865.
- (10) K. Lange and G. Du, 1989, "A formal approach to designing forming sequences for cold forging", Proceedings of NAMRC, p. 17.
- (11) A.A.K. Al-Sened, P. Hartley, C.E.N. Sturges and G.W. Rowe, 1987, "Finite element analysis of a five stage cold heading process", J. Mech. Working Tech., Vol. 14, p. 225.
- (12) S. M. Hwang and M. S. Joun, 1992, "Analysis of Hot Strip Rolling by a Penalty Rigid-Viscoplastic Finite Element Method", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 34, No. 12, pp. 971~984.
- (13) Air Force Materials Laboratory, 1973, "Forging Equipment, Materials, and Practices", Metals and Ceramics Information Center, p. 164.
- (14) S. Kobayashi and J. H. Kim, 1978, "Deformation analysis of axisymmetric sheet metal forming processes by the rigid-plastic finite element method", Mechanics of Sheet Metal Forming, edited by Koistinen and Wang, Plenum, New York, p. 341.
- (15) 황상무, 전만수, 류성룡, 문호근, 1994, "POSFORM-단조공정 해석 및 설계용 CAE시스템", 한국소성학회 '94추계학술대회 논문집', pp. 95~104.
- (16) H. S. Lee, G. C. Jun, 1995, "Metal Forming Technology for the Parts of Power Train Components in Automobile", 단조기술의 진보, 이동녕·박종진편, pp. 124~127.
- (17) E. Doege(1), H. Nagele, 1994, "FE Simulation of the Precision Forging Process of Bevel Gears", Annals of the CIRP Vol. 43, pp. 241~244.
- (18) F. H. Osman, A. N. Bramley(1), 1995, "Preform Design for Forging Rotationally Symmetric Parts", Annals of the CIRP Vol. 44, pp. 227~230.
- (19) American Society for Metals, 1975, "Source Book on Cold Forming · Metal Progress Bookshelf", pp. 38~39.
- (20) K. Sevenler, P. S. Raghupath, and T. Altan, 1987, "Forming-sequence design for multistage cold forging", pp. 121~135.
- (21) Peter Hartley, Ian Pillinger and Clive Sturges, 1992, "Numerical Modelling of Material Deformation Processes", Springer-Verlag, pp. 17~18.