

## 기어 블랭크 성형공정의 비교 해석

최 호 준, 김 장 군, 황 병 복\*  
인하대학교 공과대학 자동화공학과

# A Comparisomal Analysis among the Processes of Gear Blank

Ho-Joon Choi, Jang-Koon Kim and Beong-Bok Hwang\*  
Department of Industrial Automation, Inha University

### Abstract

Two methods for cold extrusion processes to produce an axisymmetric steel gear blank are investigated for comparing each other. The "classical" forming method consisting of four operations is selected first to be simulated using the rigid-plastic finite element method and uses single-die presses. The other using a fully automated transfer headers can produce the final part without interannealing. The final products must be checked at the design criteria such as area reduction, the extrusion ratio and punch diameter to depth ratio, especially punch buckling by simulations. FEM analysis is performed mainly for strain distribution and load-stroke relationships. Based on the results of preliminary simulation, both process sequences are proved to have proper characteristics suitable for each production method in terms of maximum load. Those simulation results will provide good design criteria in the future work to advance the manufacturing process.

**Key word** : Cold Extrusion, Gear blank, Rigid-Plastic Finite Element Method, Process Sequence, Area reduction, Design Criteria

### 1. 서론

냉간압출은 성형공정의 한 형태로서 인산염의 표면처리 등의 윤활이 가능하게 되면서 강(steel)에 대한 냉간압출이 시작되었고 펀치나 다이 등의 공구 가격이나 수명에 의존하면서 발전해오고 있다. 특히, 냉간압출은 변형 및 마찰로 인한 발생열로 압출된 금속에 재결정을 일으키지 않는 한, 가공경화로 인해 기계적 성질이 개선되며 생산속도가 높고 비교적 가공비가 저렴하므로 주로 축대칭(axisymmetric)모양의 튜브나 봉처럼 후속되는 절삭 또는 마무리 작업이 많이 필요치 않은 생산품에 적용된다. 냉간압출은 종종 냉간단조(cold forging)와 혼용되어서 쓰이며 압출, 엷셋팅 또는 헤딩, 코이닝, 아이

어닝(ironing)과 스웨이징(swaging) 등의 잘 알려진 성형과정들을 일컬이기도 하며 이들 성형과정들은 대개 기계식 또는 유압식 프레스들에 의해 수행되고 단순한 형상의 빌렛(billet)이나 슬러그(slug)로부터 시작하여 비교적 복잡한 형상의 최종생산품을 생산하기 위해서는 몇가지의 성형단계를 거치게 된다.<sup>1-4)</sup>

실제적으로 냉간압출에 있어서 공정설계는 공정결정, 예비성형체(preform) 설계, 금형설계 및 공정조건과 장비선정 등과 같은 많은 영역을 포함하고 있으며 원하는 부품 형상을 가장 경제적으로 생산할 수 있는 방법을 찾는 데 그 목적이 있다. 그리고 전문가의 다양하고 적절한 경험과 설계자의 기술축적을 효과적으로 활용함에 따라 성형공정은 결정된다. 일반적으로 성형공정에서 원하는 최종부품을 한 번의 성형공정으로 생산할 수 없는 경우가 많아 예비성형이 포함된 다단계 성형공정이 필요하지만 표면 크랙이나 내부 결함없는 복잡한 최종생산품을 얻기 위해서 최적의 공정설계를 선택하기란 쉬운 일은 아니다.<sup>5)6)</sup>

따라서 최적의 공정설계를 이루기 위하여 많은 연구들이 행하여지고 있으며<sup>7)8)9)</sup> 최근에는 컴퓨터를 이용한 공정설계 방법들이 행하여지고 있다. 대표적인 것으로는 수치해석적 방법인 유한요소법(FEM)이나 상계요소법(UBET) 등이 적용되고 있으며 특히 유한요소법은 성형공정의 해석에 일반적으로 적용이 가능하고, 응력이나 변형에 대하여 다양하고 정도 높은 정보를 제공하기 때문에 널리 사용되고 있다.<sup>10)</sup> Kobayashi와 Lee<sup>11)</sup>에 의해 소성가공의 이론적 해석이 제안된 이후 Al-Sened<sup>12)</sup> 등은 헤드포밍공정을 해석하여 4개의 가공단계에 대한 최적의 형상과 치수를 구하였으며 Hwang<sup>13)</sup> 등은 기존의 유한요소법이 안고 있는 집축문제를 개선하기 위하여 벌칙강소성 유한요소법을 개발하여 다양한 종류의 해석 및 설계문제에 성공적으로 적용하였다. 이러한 컴퓨터 모의실험 기법을 다단계 연속공정으로 이루어진 복잡한 형상의 부품 개발에 적용하여 적절한 공정설계와 공정변수를 결정할 수 있으며 실제 공정설계에 필요한 정보를 미리 얻음으로써 대부분 숙련자의 경험과 실험에 의한 시행착오를 통하여 수행되고 있는 국내 현장에서의 개발 및 생산에 소요되는 시간적, 경제적 절감효과 및 공정수의 감소 등의 효율적인 공정설계를 수행하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

그러나 현재의 많은 유한요소 모의실험에 관한 연구의 진행에도 불구하고 모의실험에 사용될 재료의 성질, 즉 유동특성 및 열전달 특성 등에 관한 연구는 그리 많지 않아서 모의실험 발전에 어려움이 있으며 삼차원 모의실험의 발달미흡으로 현장의 설계도구로 활용하기에는 아직 부적당하고 미세조직의 예측 등 유동 예측 이외의 것들도 심도 깊게 논의되지 못하고 있는 실정이다.<sup>14)</sup>

본 논문에서는 기어블랭크의 두가지 전통적인 제작방법을 강소성 유한요소법을 이용하여 모의실험을 행하고 4단계로 이루어진 공정에 대하여 변형률과 하중, 다이압 등을 해석하고 공정에 따른 설계기준을 도출하며 두 제작공정을 비교·검토하여 새로운 공정설계에 필요한 기본데이터를 제공하고자 한다.

## 2. 제작공정 및 해석방법

차동기어인 사이드기어의 제작을 위해 냉간단조로 만들어지는 기어블랭크가 본 논문의 해석대상이다. 베벨기어인 사이드기어는 다단형 정밀 냉간단조 공법과 완전 밀폐 단조, 냉간 회전단조 공법 등이 적용되고 있으며 이중 가장 많이 사용되는 것이 다단형 정밀 냉간단조 공법이다.<sup>15)</sup> 본 논문의 기어 블랭크는 베벨기어의 치형을 갖기 전 단계의 냉간단조 생산품으로써 두 가지 제작방법에 의해 생산하고 있다. 하나는 싱글다이 프레스를 이용하는 전통적인 성형방법이며 또 한가지 생산공정은 완전히 자동화된 트랜스퍼 헤더에서의 제작이 필요해짐에 따라 프레스 제작사에 의해 후에 제안되었고 두 제작방법은 모두 4단계의 공정으로 이루어져 있다. 전통적 방법은 전방과 후방압출, 전방압출, 후방압출, 업셋팅으로 공정이 진행되고 공정의 진행중에 풀림처리를 하여야 하며 다른 생산방법은 전방압출, 업셋팅, 후방압출, 업셋팅 순으로 이루어지고 풀림처리는 하지않는다. 후에 제안된 제작공정은 빌렛의 가공비를 전통적 방법에 비해 65%로 줄일 수 있으며 풀림처리가 필요하지 않기 때문에 가공시간을 절약할 수 있고 한 기계프레스에서 일괄적으로 생산할 수 있기 때문에 대량생산에 적합하다고 말할 수 있다.<sup>2)</sup> 위에 언급된 생산방법을 정리하면 아래 표와 같다.

| process<br>comparison | classical forming method<br>(method 1) | different method<br>(method 2) |
|-----------------------|--|--------------------------------|
| machine               | separate machine                       | fully automatic equipment      |
| total step            | 4                                      | 4                              |
| main<br>operations    | forward & backward extrusion           | forward extrusion              |
|                       | forward extrusion                      | upsetting                      |
|                       | backward extrusion                     | backward extrusion,            |
|                       | upsetting                              | upsetting                      |
| annealing             | after first or second operation        | no                             |

Table 1. Comparison of each manufacturing method

유한요소법을 소성가공문제에 적용할 때는 탄소성 유한요소법(elastic-plastic finite element method)과 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)으로 구별하여 적용하며 굽힘에 의한 변형이 지배적인 가공에서는 탄성변형을 무시할 수가 없으며 변형 후에 스프링백과 잔류응력 등을 알아보기 위해서는 탄소성 유한요소법을 사용한다.<sup>16)17)18)</sup> 하지만 강소성 유한요소법은 대부분 탄성변형을 무시할 수 있어서 적용하기가 쉽고 계산시간이 단축되므로 모의실험의 효율을 높이기 위해 이 방법을 사용하며 소재

는 등방성경화의 성질을 지니고 있다고 가정하고 이러한 가정들이 해의 정확도에는 큰 영향을 미치지 않는다고 보고 있다.<sup>19)</sup> 본 논문에서는 기어블랭크의 성형과정이 주로 압출에 의하여 이루어지기 때문에 강소성 유한요소법을 적용하였으며 제작에 쓰이는 재료는 AISI 5120 강재를 사용하고 윤활은 비누로 하며 마찰계수는 전 공정에서 0.1<sup>20)</sup>을 사용하였다. 또한 기어블랭크의 제작은 냉간가공작업으로 재결정온도 이하에서 이루어지므로 모의실험에 사용된 물성식은 다음의 식으로 하였다.<sup>21)</sup>

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

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

### 3. 해석결과

#### 3.1 풀립처리가 포함된 공정의 해석결과

제작방법은 앞서 표 1에서 제시한 방법1에 해당하는 공정으로 독립된 기계프레스를 사용하여 생산하며, 연속되는 중공 소재에 대한 전방압출로 인하여 발생할 수 있는 횡방향 크랙(transverse crack)을 피하기 위하여 풀립처리를 한다. 이 방법은 비교적 빌렛의 지름이 커서 큰 장비를 사용해야 하며 빌렛가공비가 상승하는 결과를 초래하게 된다.

아래의 Fig. 1은 방법1에서 행하여지는 냉간압출공정에 대한 시뮬레이션의 초기상태와 격자구성 그리고 시뮬레이션이 완료된 후 소재에 나타난 유효변형율의 분포와 다이압, 그리고 시뮬레이션에 의한 행정-하중선도를 나타내고 있다. 방법1의 첫 번째 공정은 전방과 후방압출이 동시에 이루어지며 특히 후방압출을 통하여 기어블랭크의 전체

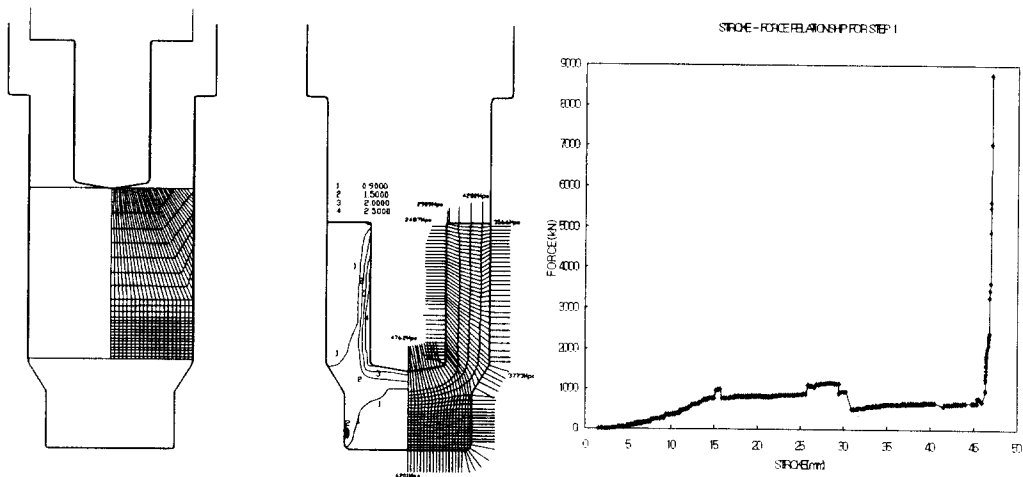


Fig. 1. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationship for step 1 in the method 1

윤곽을 형성시키는 역할을 하는 부분으로 다음 공정에서 빌렛을 중공축 형상의 2차가공으로 전방압출을 수행하기 위하여 펀치로 빌렛의 중심부를 눌러 중공축으로 만드는 공정이다. 후방압출에 있어서 캐비티 최대 높이와 펀치 지름의 비가 약 2.1로써 전문가가 제시한 3을 초과하지 않으며 단면감소율은 탄소강에서 최대면적감소율과 최소면적감소율의 한계를 각각 70-75%, 20-25%로 정하고 있어서 첫 번째 공정의 면적감소율은 46.5%이므로 안정적으로 후방과 전방압출을 행할 수 있다.<sup>22)</sup> 유효변형율은 약 2.5까지 분포를 보이고 있으며 주로 펀치의 벽면을 따라 일어나고 있어서 냉간성형에 의한 가공경화가 펀치의 벽면을 따라 집중적으로 발생하고 있음을 보여준다. Fig. 1의 중간 그림은 첫 번째 공정의 끝단계에서의 변형율의 분포와 함께 다이압의 분포를 직선으로 나타낸 것이다. 펀치의 아래 끝단에서 가장 큰 압력을 받고 있음을 알 수 있으며 다이의 벽면을 따라서는 거의 일정한 값의 압력이 분포함을 알 수 있다.

지름 52.07 mm, 높이 58.42 mm인 초기 빌렛을 사용하여 제작하며 이공정의 최대하중은 2195kN이고 소요에너지는 58.48kJ이다. 이 공정의 펀치 길이는 50.8 mm이고 펀치 직경은 24.13 mm로 펀치길이대 직경비가 2.105, 펀치에 작용하는 압축응력을 문헌에 제시된 방법에 따르면 약 2150 N/mm<sup>2</sup>로 계산되고, 이들 값과 압출비, 최대하중 등을 이용하여 전문가에 의해 제시된 고속도강 펀치의 좌굴(buckling)을 판별하는 그래프에 적용한 결과 한계영역내에 존재하므로 펀치에는 좌굴이 일어나지 않을 것이라고 판단된다.<sup>2)</sup>

Fig. 2는 두 번째 공정인 전방압출과정으로서 풀림처리를 하였으므로 전단계작업에 의한 영향은 없는 것으로 하여 새로운 격자를 구성하여 모의실험을 진행하였으며 유효변형율의 크기는 약 1까지의 값을 보이고 전방압출된 지름이 작은 아래단의 변형부에 전반적으로 골고루 분포되어 있다. 다이압은 펀치에서는 하단의 끝부분과 상단부와의 단진부분에, 다이에서는 하단부 가장 아래부분 및 경사진부분과 펀치와 다이가 처음 만나는 윗단의 경계에서 크게 작용하며 공정중 하중은 전방압출이 진행되는 동안 계속 증가하고 공정이 끝나는 부분에서 격자의 경계점들이 다이에 모두 닿을 때쯤 급격한 증가를 보이고 있다. 공정중 최대하중은 2253kN, 소요에너지는 약78kJ이다.

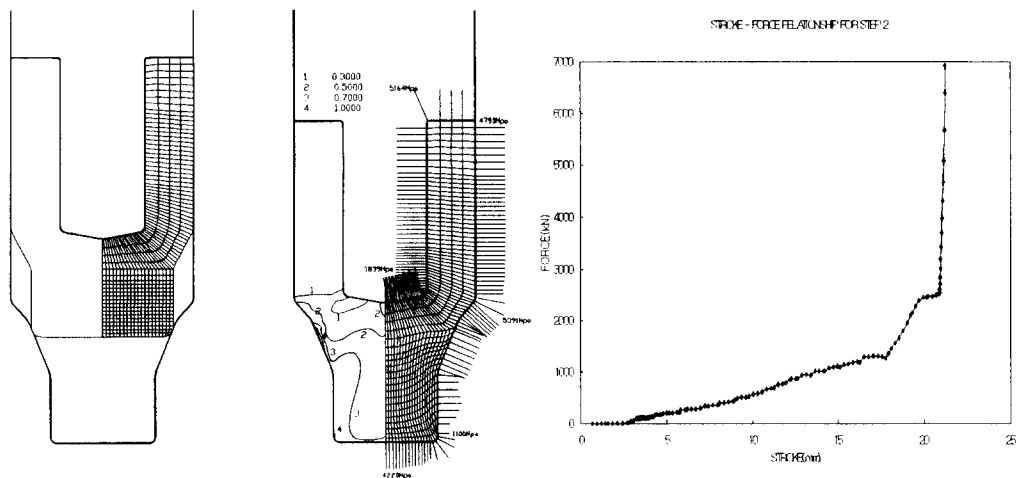


Fig. 2. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationship for step 2 in the method 1

Fig. 3은 세 번째 공정인 후방압출공정으로 컵드로잉 작업의 변형된 모습이며 벽면의 두께를 줄이기 위한 작업으로 다음 공정인 업셋팅을 위해 머리부분을 예비성형시킨다.

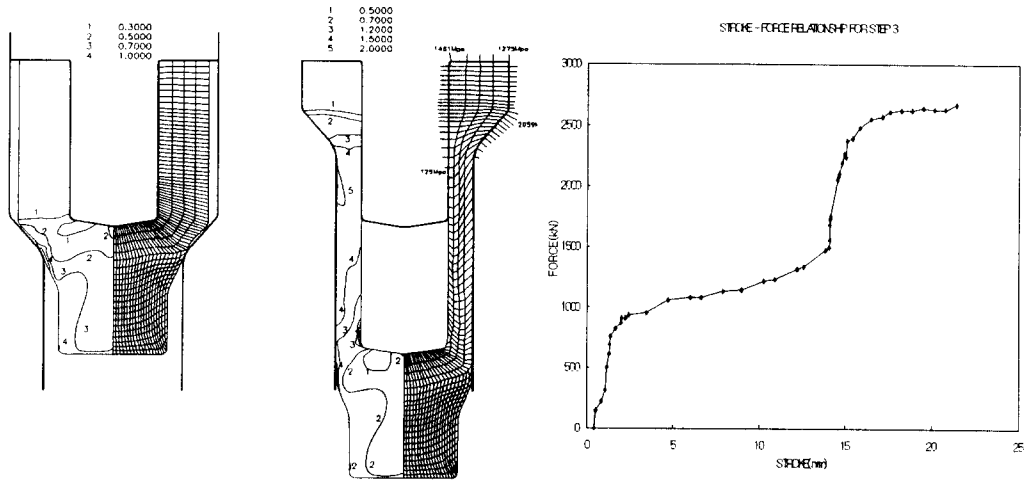


Fig. 3. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationship for step 3 in the method 1

유효변형율은 약 2까지의 값을 가지며 변형이 주로 이루어지는 벽면전체에 고른 분포를 보이고 있으며 다이압은 전 단계에 비하여 비교적 작은 값을 나타내고 있으나 큰 값을 갖는 부위는 변함이 없다. 행정-하중선도에서는 처음 약 3mm 부분까지 다이 하단부의 경사면을 따라 소재가 유동을 시작함에 따라 급격히 하중이 증가하며 이후로는 꾸준하게 상승하고 업셋팅을 위한 예비성형인 상단부를 형성시킬 때 또다시 하중이 가파른 경사를 갖고 증가한다. 이 공정의 최대하중은 1201kN, 공정중 소요에너지는 약63kJ이다.

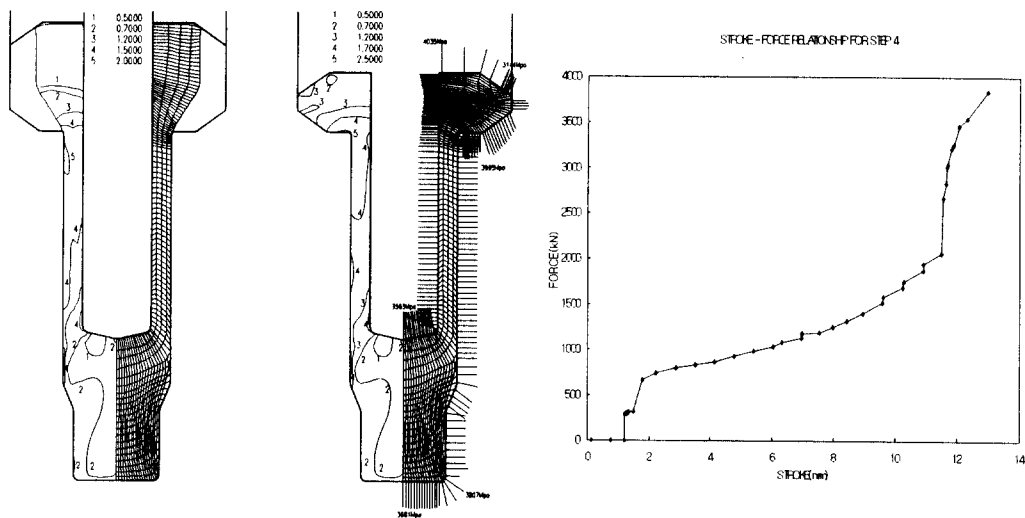


Fig. 4. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationship for step 4 in the method 1

Fig. 4는 전통적 기어블랭크의 제작방법중 마지막 공정인 업셋팅으로 베벨기어의 이가 될 부분을 성형시키는 작업이다. 이 공정은 정형가공을 위해서는 반드시 필요한 부분이며 베벨기어를 만들기 위해서는 꼭 선행되어야 한다. 유효변형율의 분포중 주로 큰 값들은 업셋팅이 이루어진 소재의 상단부에 위치에 있고 약 2.5까지의 값을 갖는다. 다이압은 펀치의 하단부 끝, 펀치가 끝나는 상단부의 단진 부분, 소재의 업셋팅 부분이 접촉하는 다이상단부가 높게 나타난다. 행정-하중에 있어 하중은 소재의 상단부가 펀치에 밀려 다이의 상단부에 접촉하면서 부터 빠르게 증가하며 경계점들이 펀치와 다이에 완전히 접촉함에 따라 최대하중을 나타내게 된다.

### 3.2. 풀림처리 없는 공정의 해석결과

두 번째 기어블랭크 제작방법은 풀림처리 없이, 하나의 기계프레스에서 냉간가공을 통해 모든 제작공정이 이루어질 수 있도록 프레스제작사들에게 요청되어짐에 따라 만들어진 성형과정이며 빌렛의 바깥지름과 최종생산품의 중공축 부분의 바깥지름을 같게하면서 공정을 연속적으로 진행시킨다. 또, 세 번째와 네 번째의 공정에서는 두 번째 공정에서 생성되는 300-400F(149-204°C)의 발생열을 이용하여 큰 변형을 주어 기어블랭크를 완성시킨다.<sup>2)</sup>

Fig. 5는 새로운 제작방법의 첫 번째 공정인 전방압출이며 첫 번째 그림은 전 공정의 최종 빌렛과 이 공정을 끝마친 소재를 함께 보여주고 있다. 모든 공정중에 안내역할을 할 수 있는 하단부를 성형하기 위한 공정이며 유효변형율의 크기는 약 1의 값까지 갖으며 최대하중은 2195kN, 소비된 에너지는 13.79kJ이다. 소재의 단면감소율은 20.5%로 전문가에 제시된 한계 즉, 저탄소강은 35%, 중탄소강은 40%를 넘지 않으며 특히 본 공정의 다이처럼 전방압출부분에 테이퍼를 갖고 있는 경우에는 그 한계 단면감소율이 70-75%에 이르므로 안전한 압출공정을 이룰 수 있다.<sup>22)</sup> 다이압은 다이 하단부의 테이퍼부분과 바닥면이 제일 큰 값을 가진다.

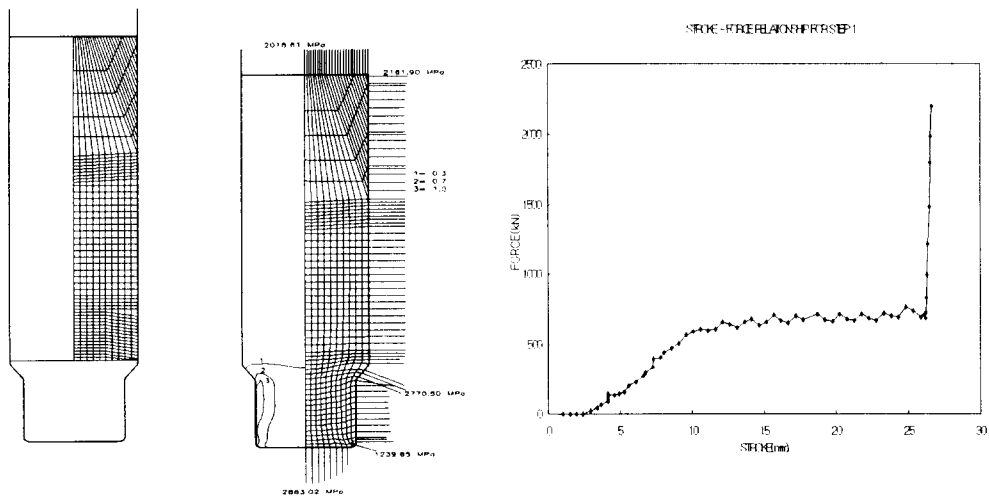


Fig. 5. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationship for step 1 in the method 2

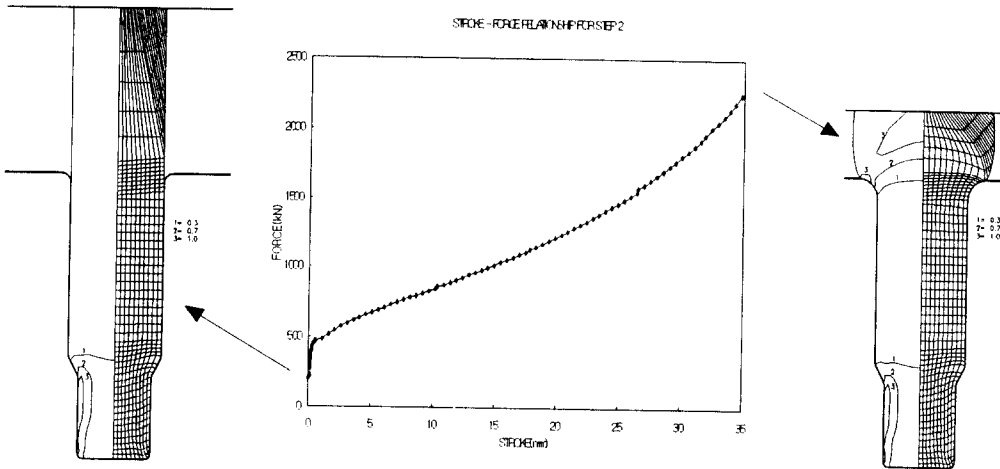


Fig. 6. Deformation patterns and load-stroke relationships for step 2 in the method 2

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 업셋팅과 후방압출공정으로서 업셋팅공정은 마지막 단계인 최종의 업셋팅작업을 좀 더 쉽게 하기 위함이며 후방압출공정은 최종제품의 높이를 올바르게 확보하기 위해 필요하다. 업셋팅은 소재의 상단부를 펀치의 하단부로 눌러서 변형시켜 원하는 형상을 얻으며 유효변형율은 변형이 가해진 상단부에 집중되어 분포되어 있으며 소재의 지름대 업셋팅의 길이의 비는 1.58로 전문가에 의해 제시된 2를 초과하지 않는다.<sup>22)</sup>

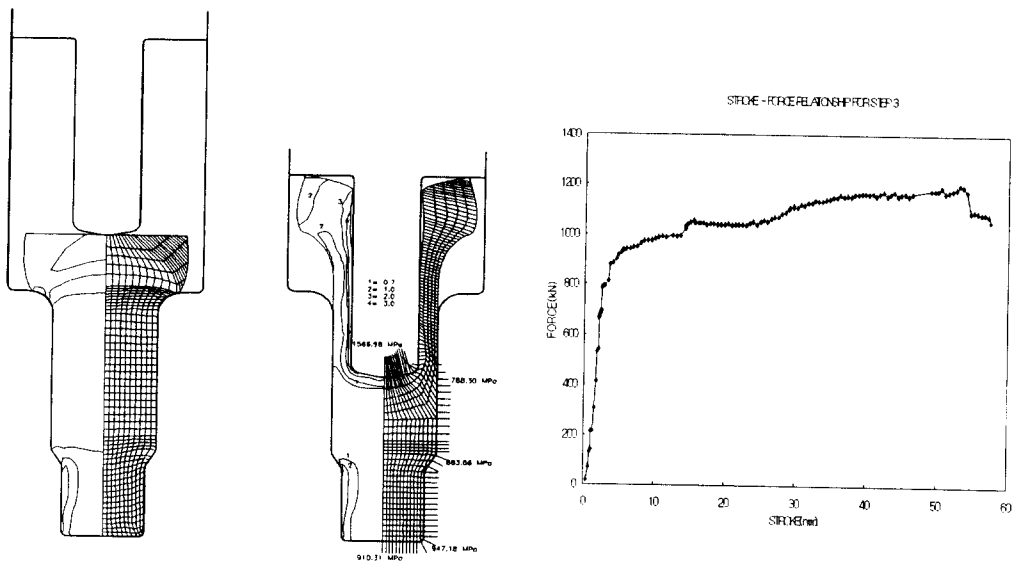


Fig. 7. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationships for step 3 in the method 2

후방압출공정에서는 1차 업셋팅이 끝난 소재의 중공축 부분을 후방압출을 통해 길이 방향으로 늘리는 역할을 하는 단계이며 변형율은 약 3까지의 값을 가지며 펀치벽면을



따라서 고르게 나타나고 있으며 펀치에 가까울수록 큰 값을 가진다. 펀치직경대 길이의 비가 3.5로 좀 크지만 압출비 1.56과 소재의 중공축부분의 안지름, 바깥지름을 이용하여 전문가에 의해 제시된 펀치의 좌굴여부의 그래프를 확인해본 결과 소재의 최대압축응력이 약 1600 N/mm<sup>2</sup>으로 계산되므로 좌굴은 발생하지 않는다.<sup>2)</sup> 다이압은 펀치의 하단부 끝에서 큰 값이므로 변형에 유의하여 공정이 진행되어야 한다. 행정의 끝에서 최대하중은 두 번째 공정에서 2254.76kN이며, 세 번째 공정에서는 1201.05kN이고 소요에너지는 각각 41.81 kJ, 60.27kJ이다.

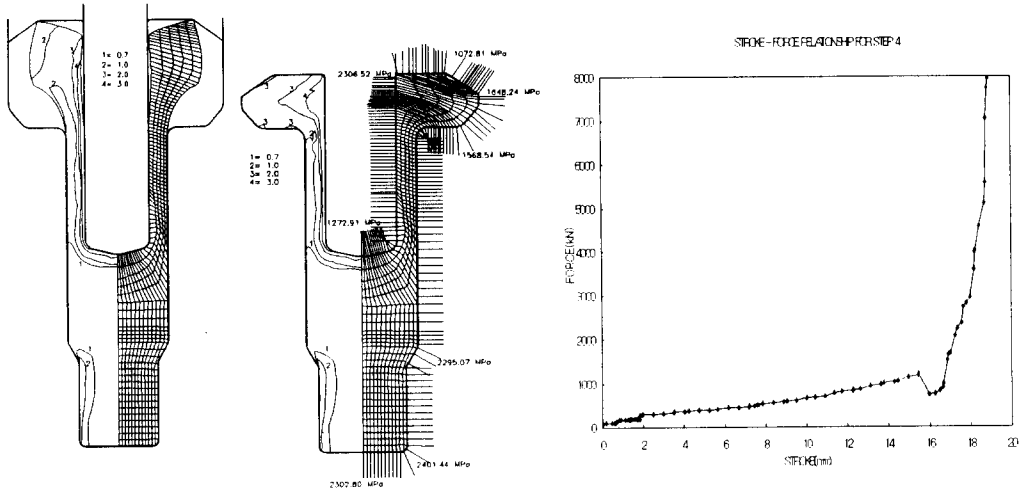


Fig. 8. Deformation patterns, die pressure and load-stroke relationships for step 4 in the method 2

Fig. 8은 기어블랭크의 두 번째 제작방법중 마지막 공정으로 베벨기어의 이가 형성될 소재의 상단부 모양을 최종적인 업셋팅으로 성형하는 단계이다. 행정-하중선도에서는 하중이 계속적으로 증가하는 경향을 띠고 있으며 유효변형율은 약 3까지의 값을 갖고 분포하며 특히 상단부의 업셋팅부위에 변형이 많이 가해졌음을 암시하는 결과를 보이고 있다. 다이압은 다이의 하단부, 상단부와 의 경계면이 테이퍼부분과 펀치의 하단부 끝면, 하단부와 상단부의 단지는 부분에서 크게 발생하며 이러한 부분들은 다이나 펀치의 마모가 심하므로 삽입가능하도록 금형을 제작하여 공정중에 발생할 수 있는 고장이 미리 대비하여야 한다. 이 공정에서의 최대하중은 796.67kN이고 소요된 에너지는 17.56kJ이다.

#### 4. 공정의 해석에 따른 결과 정리 및 비교·검토

각각의 공정에 따라 분리된 기계프레스를 이용하여 최종제품을 생산하는 기존의 전통적인 생산방법과, 자동장비를 이용하여 모든 공정을 함께 수행하는 생산공정에 대한 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

1. 두 생산방법의 전방압출, 후방압출과 업셋팅은 전문가에 의해 제시된 압출비, 면적감소율과 편치직경대 길이비는 모두 가공규칙 한계내에 있다.
2. 최대하중면에서 볼 때 두 생산공정 모두에서 마지막 작업인 업셋팅작업이 제일 큰 값을 나타내고 있으며 소비에너지측면에서 두 번째가 첫 번째 제작방법보다 소비에너지의 편차가 크지 않은 것으로 보아 대량생산에는 역시 나중에 제안된 방법이 유리한 것으로 판단된다.
3. 개선된 방법의 편치길이가 다소 길지만 편치에 좌굴은 발생하지 않으며 트랜스퍼 헤더를 사용하는데 발생하는 문제점은 없는 것으로 보인다. 그러나 최대하중은 각 단계 별로 차이가 심하여 헤더의 편치들에 가해지는 압축응력이 달라져 가공특성상 좋은 공정배열이라고 하기 힘들다. 따라서 개선된 공정설계와 생산장비의 선정이 재검토 되어야 한다고 생각한다.
4. 유효변형율의 크기나 분포는 두 공정 모두 편치의 벽면과 업셋팅면을 따라 커다란 분포를 보인다. 그러므로 냉간압출작업에 의한 가공경화는 기어블랭크의 안쪽과 상단부의 업셋팅부분에 집중됨을 알 수 있으며 최종 생산품 상단의 업셋팅부분에 베벨기어의 이를 만들기 위한 단조나 기계가공은 적합하다고 할 수 있다.

후 기 : 본 논문은 인하대학교 및 (주)쌍용정공의 연구비지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegal, 1983, "Metal Forming: Fundamentals and Applications," American Society for Metals, pp. 231-233.
2. American Society For Metals, 1975, "Source Book on Cold Forming," Library of Congress Cataloging in Publication Data, p. 35-341.
3. N. S. Kim, Y. T. Lim and J. T. Jin, 1995, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," Pando Press, 2nd Edition, pp. 320-321.
4. T. Reinikainen, A. S. Korhonen(1), K. Andersson, S. Kivivuori, 1993, "Computer-Aided Modeling of a New Copper Extrusion Process," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1.
5. C. R. Boor, F. Jovano, 1984, "Computer Aided Design in Metal Forming Systems," Annals of the CIRP, Vol. 33, No. 2.
6. J. H. Lee, B. S. Kang and B. M. Kim, 1995, "Feasibility Study on Three-Dimensional Backward Tracing Scheme of Rigid-Plastic Finite Element Analysis," Official J. of the Korean Sci. for Tech. of Plasticity, Vol. 4, No. 3, p. 267-268.
7. S. K. Biswas and W. A. Knight, 1974, "Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies," Proc. 15th Int. MTDR Conf., p. 135.
8. N. Akgerman and T. Altan, 1972, "Recent Developments in Computer-Aided

- Design of Firing Process," SME Technical Paper, No. 72-110, April.
9. 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.
  10. B. H. Jeon, D. K. Min, H. J. Kim and N. S. Kim, 1994, "A Study on the Process Improvements of the multi-stage Deep Drawing by the Rigid-plastic Finite Element Method," *Official J. of the Korean Sci. for Tech. of Plasticity*, Vol. 3, No. 4, pp. 440-441.
  11. C. H. Lee and S. Kobayashi, 1973, *Trans, ASME, J. of Engrg. for Ind.*, 95, p. 865.
  12. 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.
  13. 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.
  14. S. I. Oh, '94 Fall Conference, "Simulation and Metal Forming Processes," *Official J. of the Korean Sci. for Tech. of Plasticity*, pp. 7-22.
  15. H. S. Lee, G. C. Jun, 1995, "Metal Forming Technology for the Parts of Power Train Components in Automobile," *단조기술의 진보, 이동녕 · 박종진 편*, pp. 124-127.
  16. K. lange, M. Herrmann, P. Keck and M. Wilhelm, 1991, "Application of an elasto-plastic finite element code to the simulation of metal forming processes," *J. Material Processing Technology*, Vol. 27, p. 239.
  17. M. J. Saran, 1991, "Comparison of elastic-plastic and rigid-plastic implicit FEM simulations in sheet forming applications," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 27, p. 279.
  18. J. H. Cheng and N. kikuchi, 1985, "An analysis of metal forming processes using large deformation elastic plastic formulations," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 49, p. 71.
  19. 황상무, 전만수, 류성룡, 문호근, '94추계학술대회 논문집, "POSFORM-단조공정 해석 및 설계용 CAE시스템", 한국소성학회, pp. 95-104.
  20. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press.
  21. Air Force Materials Laboratory, 1973, "Forging Equipment, Materials, and Practices," Metals and Ceramics Information Center, p.164.
  22. K. Sevenler, P. S. Raghupath, and T. Altan, 1987, "Forming-sequence design for multistage cold forging", pp. 121-135.