

강소성 유한요소법의 역추적기법을 활용한 차동사이드기어의 스플라인 성형에 관한 연구

김상현*, 강범수(부산대학교), 이정환(한국기계연구원)

Preform Design in forging of Spline of Side Gear by the FEM

Sang-Hyun Kim*, Beom-Soo Kang(Pusan National Univ.)
Jeong-Whan Lee(KIMM)

ABSTRACT

Differential side bevel gears have been produced by machining process, but recently cold forging process for the bevel gear is under development in domestic industry. This study presents the possibility to form not only bevel gear but also spline gear at the same time using the experiment and numerical analysis. The preform shape is designed to form both bevel gear and spline gear simultaneously by the backward tracing scheme of the rigid-plastic finite element method(FEM). The experimental results confirm that the numerically-designed preform is satisfactory to form both bevel gear and spline gear. It is noted that the backward tracing scheme is helpful in designing preforms.

1. 서론

냉간단조공정은 성형공정 동안 기계적 성질이 크게 향상되며, 양호한 표면 마무리 및 치수정밀도, 높은 생산성 등으로 인하여 항공기, 자동차 및 첨단기계 등과 같은 복잡한 형상의 부품생산에 적합하다.

그러나 냉간단조공정에서 한번의 성형공정으로 복잡한 형상의 부품을 성형한다는 것이 매우 어려우므로, 보통 한단계 또는 여러 단계의 예비성형이 필요하나, 대부분의 단조공장에서는 경험적 지침, 설계자의 직관 및 실험에 의한 시행착오를 통하여 예비성형체와 예비성형 횟수를 결정하므로, 시간의 소비가 많고 제품의 가격 인상을 초래하게 된다. 또한 소재의 유동이 가공경화 특성에 영향을 받기 때문에 예비성형공정의 설계는 더욱 어려워지므로, 냉간단조 공정설계에 있어서 가장 중요한 사항은 예비성형체의 설계^(1~2)이므로 이에 관한 연구가 필요하다.

단조공정에 있어서 소재의 유동해석 및 예비성형체의 설계에 관한 연구는 수치해석법이나 모형재료를 통한 실험이 많이 사용되고 있는데, 초동해석법, 미끄럼 선장법, 상계법 등과 같

모형재료를 통한 실험이 많이 사용되고 있는데, 초등해석법, 미끄럼 선장법, 상계법 등과 같은 해석기법을 통한 연구⁽³⁻⁴⁾는 복잡한 부품의 단조공정 해석을 위한 자세한 정보를 제공하지 못하므로, 최근에는 보다 나은 소재의 변형 거동에 관한 정보를 제공하는 유한요소법(FEM)이 널리 사용되고 있다.⁽⁵⁻⁶⁾

또한, 다단계 금속 성형 공정 설계의 가장 중요한 사항 중의 하나인 예비성형체 설계를 위하여 Kobayashi⁽⁷⁾ 등은 유한요소법에 역추적기법을 도입하여 단조 공정을 설계하였으며, 특히 Kang⁽⁸⁾ 등은 플래쉬가 없는 단조공정 설계를 위하여 역추적기법을 사용하여 소재의 초기 단조위치 및 형상을 결정하였다.

일반적으로 모든 자동차와 트럭의 차동 장치는 베벨기어 세트를 사용하며, 이는 차축에 있는 휠의 회전 속력을 조절하는데 사용된다. 특히, 베벨기어 형태인 차동 사이드 기어(differential side gear)는 형상이 복잡하고 부피가 큰 부품으로서 높은 강도가 요구되므로 냉간단조에 의해 거의 정형으로 생산하기 위해서는 많은 노력이 필요하다.

차동 사이드 기어를 포함한 기어 단조 생산에 관한 연구는 Altan 등과 같은 많은 학자들에 의해 연구되었으며, 국내에서도 이에 관한 연구가 수행되고 있다.⁽³⁻¹¹⁾

대부분 차동 사이드 기어의 생산은 외부의 베벨기어만 우선 성형하고 내부의 스플라인 기어는 브로우치절삭(broaching)을 통하여 행하고 있다. 그러나 축방향의 스플라인도 베벨기어 단조시에 동시에 성형할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

본 연구에서는 베벨기어 치형과 스플라인 치형의 성형을 동시에 행할 수 있는 냉간단조 공정설계를 실험 및 유한요소법을 사용하여 시도하였다. 먼저 납을 이용한 예비실험을 통하여 가능한 예비성형체를 선정, 유한요소 시뮬레이션을 행하였다. 이를 토대로 미충진 부위가 없이 베벨기어 뿐만 아니라 스플라인까지 성형할 수 있는 최적의 최종 예비성형체를 구하기 위하여 역추적기법을 이용하였고, 역추적 시뮬레이션으로 구한 예비성형체를 사용하여 최종 실험을 행한 결과 베벨기어 및 스플라인 치형을 성형하는 데 성공하였다.

2. 새로운 생산공정

그림 1은 차동 사이드 기어의 치형과 스플라인을 동시에 성형하기 위하여 새롭게 제시한 냉간단조공정을 나타낸다. 초기의 빌렛에서 외부 베벨기어를 성형하기 위한 예비성형공정인 업셋팅(upsetting), 스플라인부를 성형하기 위한 오목부성형과 피어싱(piercing) 및 밀폐형 단조공정인 다섯단계의 성형공정으로 이루어져 있다.

이러한 다섯단계의 성형공정에 대한 실험결과에 의하면 각각의 공정 중에서 최종단조품의 성형결과에 가장 큰 영향을 주는 것은 피어싱공정 후의 예비성형체의 형상이다(그림 1(d) 참조). 따라서 치형과 스플라인부에 미충진이 없는 최종단조품을 성형하기 위해서는 피어싱공정으로 생기는 예비성형체를 설계하는 것이 중요하다.

그러므로 여기서는 피어싱공정 후의 예비성형체를 설계하는 데 주력하였으며, 이 예비성형체 성형에 영향을 주는 변수들을 실험을 통해서 구하였다. 예비성형체 설계에 대한 실험 결과로서 예비성형체의 형상을 좌우하는 가장 큰 변수는 선단부 각도와 최대외경이며, 결국은 이러한 변수들이 최종단조품인 기어의 성능을 좌우한다. 따라서 위의 변수들로 부터 구한 예비성형체가 최종단조품에 미치는 영향을 베벨기어 치형과 스플라인으로 나누어 기술한다.

2.1 치형성형

치형성형에 있어서 가장 중요한 사항은 치형의 상부와 보스부의 미충진, 그리고 하부의 플래쉬 발생을 제어하는 것이다. 따라서 여기서는 위의 변수들로 부터 구한 예비성형체가

치형성형에 미치는 영향을 언급하기로 하였다.

1) 선단부 각도 제어

그림 2는 실험에 의한 결과로서 선단부 각도가 치형성형에 미치는 영향을 나타내고 있다. 예비성형체의 선단부 각도를 각각 치원원추각, 피치원추각, 치선원추각을 기준으로 하여 실험을 행하였다. 선단부 각도에 따라서 미충진 부위의 크기와 위치에 많은 차이가 있었다. 그림 2에서 보듯이 선단부 각도가 치저원추각 기준(그림 2(a))일 때는 치형 하부에 미충진이 발생하였고 피치원추각 기준(그림 2(b))일 때는 이 끝에 약간의 미충진이 발생하였다. 또한, 치선원추각 기준(그림 2(c))일 때는 치형 상부에 미충진이 발생하였다. 그러므로 치형성형에 있어서 예비성형체의 선단부 각도는 피치 원추각 기준일 때가 가장 최적임을 알 수 있었다.

2) 최대 외경 제어

선단부 각도와 같이 예비성형체의 최대 외경의 크기도 치형성형을 크게 좌우한다. 예비성형체의 최대외경은 항상 일정한 것이 아니라 최종단조품의 최대외경에 따라 조절해야 한다. 실험에 의한 결과로서 미충진 부위가 없는 최적의 최대 외경은 46~48mm임을 알 수 있었다. 최대 외경이 48mm보다 크면 치형성형용 부분이 절삭 형태로 성형이 이루어 지거나 플래시가 발생하였고, 46mm보다 작으면 치형 끝에 미충진 부분이 발생하였다.

2.2 스플라인 성형

앞에서 행한 치형성형 실험의 결과를 이용하여 스플라인 성형을 위한 실험을 행하였다. 예비성형체의 선단부 각도는 피치 원추각을 사용하였고 최대 외경은 48mm로 하였다. 또한 보다 나은 스플라인 성형을 위한 방법으로 업셋팅이 되면서 내경 방향으로 유동이 발생하여 스플라인 성형이 되도록 보스부 외경을 2mm 크게 하였다. 여기서의 치수는 스플라인 치형을 성형하는 데 필요한 체적을 구하여 이것을 다시 두께 방향으로 환산하여 구하였다. 이때의 실험 결과가 그림 2의 (d)에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 외부 베벨기어 치형성형은 문제가 없으나 스플라인 보스부에는 미충진 부분이 발생하였다.

이상과 같은 실험 결과를 통해서 예비성형체의 선단부 각도와 최대외경이 베벨기어 치형 및 스플라인 성형에 미치는 영향을 알 수 있었다. 최적의 스플라인 성형을 위해서는 업셋팅이 되면서 내경 방향으로 균일하고 지속적인 유동이 발생해야 하는데 선단부 각도를 피치 원추각으로 실험한 경우에는 이러한 요구조건을 충족시키지 못하여 완전한 스플라인 성형을 할 수 없었다. 그러므로 미충진이 없는 치형과 스플라인 성형을 위해서는 선단부 각도를 새롭게 제어하는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 우선 피치 원추각으로 하중과정 시뮬레이션을 행한 후 미충진 부위가 없는 최적의 스플라인 성형을 위해서 역추적기법을 이용하였다.

3. 예비성형체 설계

3.1 유한요소 모델링

베벨기어의 단조에서 재료유동은 상부금형의 수평 윗면이 닿는 초기 경우에는 축대칭 소성유동을 나타낸다. 그러면 뿌리 근처에서의 유동은 치형내로 전환되고 기어 이빨이 성형되면서 3차원 유동으로 바뀐다. 그러나 기어 이빨의 중앙선이나 기어 뿌리에서의 축대칭 조건으로 이 면에서의 치형중심과 치형뿌리의 소성유동은 단지 반지름 방향으로만 형성된다. 또한 실제 성형에서도 기어 이빨의 성형이베벨기어 성능을 좌우하기 때문에 축대칭 유한요소

시뮬레이션을 행하여 그 소성유동을 보는 것도 현실적으로 바람직하다.

3.2 유한요소 시뮬레이션 및 결과

실제로 3차원 형상인 차동 사이드 기어를 컴퓨터 시뮬레이션의 효율성을 높이기 위하여 2차원 유동으로 정밀 근사 시켜 공정설계를 행하였다. 이를 위하여 차동 사이드 기어의 베벨 기어 치형 부분은 베벨기어의 齒先과 齒元의 평균값을 택하였고 이를 바탕으로 최종 단조품의 형상과 다이의 형상을 구하여 시뮬레이션을 행하였다. 또한 스플라인 역시 치선과 치원의 평균값을 사용하여 업셋팅이 되면서 내경 방향으로 유동이 발생하여 스플라인 성형이 되도록 유도하였다. 그림 3은 차동 사이드 기어 최종단조품의 2차원 형상과 치수이다.

먼저 차동 사이드 기어의 실험으로 구한 예비성형체를 초기 빌렛으로 하여 최종 형상까지 시뮬레이션을 행하였다. 그림 4의 (a)는 시뮬레이션을 위한 초기 격자 시스템이다. 그림 4(a)의 초기 격자 시스템을 위에서 구한 다이의 형상으로 하중과정 시뮬레이션을 행하였다. 그림 4의 (b),(c),(d)는 이때의 시뮬레이션 과정을 나타낸다. 그림 4의 (d)에서 보듯이 보스(boss) 하단 부분이 완전히 차지 않았고, 왼쪽 상단 부분에 약간의 미충진 부분이 발생하였다. 또한 스플라인 성형이 거의 동시 이루어지지 않았고 상단부터 순차적으로 성형됨을 알 수 있었다. 베벨기어의 성형은 큰 문제가 없으나 스플라인부의 성형은 이 예비성형체를 사용하면 어렵게 나타나며, 이러한 결론은 그림 5의 유효변형을 분포에서도 잘 나타난다. 스플라인부의 유효변형률이 매우 낮은 값을 보이는 것은 실제 성형이 되지 않음을 의미하며, 앞에서 행한 실험결과와 동일한 소성유동을 나타내고 있다.

위의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 조금 수정된 예비성형체를 구하였다. 보스 하단부를 완전히 성형하고 스플라인 성형을 거의 동시에 수행하기 위해 예비성형체의 내부에 직선이 아닌 약간의 경사를 두었다. 이때 경사의 각도는 위의 시뮬레이션에서 스플라인에 접촉하는 절점(nodal point)의 순서, 시간 및 이때의 속도를 구하여 역으로 계산하였다. 또한 예비성형체를 구할 때 유의해야 할 사항은 최종 단조품이 축대칭이므로 면적일정조건이 아닌 체적일정조건을 적용해야 한다.

그림 6은 이때의 하중과정 시뮬레이션 과정을 나타낸다. 그림 6에서 보듯이 보스 하단부가 완전히 성형되었고 스플라인 성형도 거의 동시에 수행됨을 알 수 있었다. 다만 왼쪽 상단부에 여전히 약간의 미충진 부분이 발생하였다. 그러나 이때의 예비성형체는 이론적인 근거가 없는 경험적 지식을 바탕으로 구한 것이기 때문에 보다 나은 예비성형체를 구하기 위해 역추적기법을 사용하였다.

그림 7은 역추적 과정에서 워다이로부터 분리되는 절점의 좌표를 나타내고 그림 8은 하부 다이에서 행정에 따른 절점의 detaching 과정을 나타낸다. 이러한 정보는 앞에서 행한 하중과정 시뮬레이션을 통해서 얻은 것이다.

본 연구의 목적은 기어성형과 더불어 스플라인의 성공적인 성형에 있다. 따라서 공동(cavity)이 없는 스플라인 성형을 위하여서는 성형 최종단계에서의 스플라인 성형 부위의 반지름 방향 소성유동이 존재하여야 한다. 그림 9(a)에 있는 역추적기법의 최종 단계에서 스플라인이 성형되는 부위의 반지름 방향 소성유동을 동일하게 가정한다. 이상과 같은 방법으로 역추적기법을 활용하여 시뮬레이션 한 결과가 그림 9에 나타나 있다. 그림 9(d)와 같이 수정한 예비성형체와 유사한 최종의 예비성형체를 구할 수 있었다. 그러나 역추적 기법을 통해서 구한 예비성형체는 생산현장에서 가공하기가 어려우므로 가공을 보다 쉽고 원활하게 하기 위해 예비성형체의 곡선 부분을 여러 개의 직선으로 약간 수정하여 다시 시뮬레이션하였다.

그림 10은 이때의 하중과정 시뮬레이션을 나타낸다. 그림 10에서 보듯이 보스 하단부와

왼쪽 상단부가 완전히 성형되었고, 스플라인 치형도 미충진 부분이 없이 거의 동시에 성형되었다. 그림 11은 이때의 유효변형률 분포이고, 그림 12는 전체 과정에 따른 단조하중의 변화를 나타낸다. 단조하중은 행정의 증가에 따라 거의 비례적으로 증가하지만 마지막 부분에서는 상부면과 하부면이 성형되면서 하중이 급증함을 알 수 있다.

4. 결론

실제 산업현장에서 성형하고자 하는 3차원 형상인 차동 사이드 기어를 축대칭으로 정밀 근사시켜, 이를 성형하기 위한 냉간단조 공정설계를 강-소성 유한요소 시뮬레이션하였다. 차동 사이드 기어를 구성하고 있는 베벨기어 치형 및 스플라인 치형을 결합없이 완전하게 성형하기 위한 최적의 최종 예비성형체를 설계하기 위하여 역추적기법을 사용하였으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 차동 사이드 기어를 정형(net-shape)의 부품으로 성형하기 위해서 예비성형체의 설계를 행하였다.
- 2) 베벨기어 치형에 미충진 부분이 없고 스플라인 성형을 거의 동시에 수행하기 위해서는 예비성형체의 내부, 즉 스플라인 내부에 약간의 경사를 두어야 한다. 실험에서는 스플라인 성형에 영향을 주는 가장 큰 변수가 선단부 각도였지만, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 내부 스플라인부의 각도 역시 스플라인 성형에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
- 3) 접침 현상을 최소로 하고 미충진 부분이 없는 스플라인 성형을 위해서 스플라인이 성형되는 내부면에서의 내경방향 속도가 가장 큰 경우를 택하였다. 또한, 최적의 스플라인 성형을 위해서는 내경 방향으로 균일하고 지속적인 유동이 발생하여야 하므로 이점을 고려하여 예비성형체를 설계하였다. 이러한 최적의 예비성형체를 구하기 위하여 역추적기법을 사용하였다.

참고문헌

- 1 Lange,K., 1958, "Closed-Die Forging of Steel (in German)," Springer-Verlag GmbH & Co. KG.
2. Sabroff,A.M., Boulger,F.W., and Henning,H.J., 1968, "Forging Materials and Practices", Reinhold Book Cooperation.
3. Dohmann,F. and Traudt,O., 1984, "Metal Flow and Tool Stress in Cold Forging of Gear Component," Advd. Tech. Plasticity, Vol. 2, p.1081.
4. Izumisawa,M., 1979, "Effects of Die and Workpiece Geometry on the Defect Formation on the Tooth Face of Hot Forged Straight Bevel Gears," J. of JSTP, Vol 16, No. 178, p.1049.
5. Yoon,J.H. and Yang,D.Y.,1990,"A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique," Int. J. Mech, Sci., Vol. 132, p.277.
6. Knoeer,M., and Altan,T., 1992, "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes", J. of Materials Processing Technology, Vol. 35, p.275-302.

- Metal Forming with the Finite Element Method", *Int. J.Mach. Tool Des. and Res.* Vol. 23, No. 1, pp. 71-79.
8. Kang,B.S., Kim,N.S. and Kobayashi,S., 1990, "Computer Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade", *Int. J. Mach. Tools. Manufact.*, Vol. 30, No. 1, pp. 43-52.
 9. Park,J.J. and Lee,J.W. 1993, "Research on Gear Manufacture by Cold Forging", *Int. J.of Mech, Sci.*, Vol. 33, No. 3, p.213.
 10. Meidert,M., Knoerr,M., Westphal,K., and Altan,T.,1992, "Numerical and physical modelling of cold forging of bevel gears", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 33, p.75-93.
 11. Meidert,M., Knoerr,M., Altan,T.,1991,"Investigation of physical and numerical modelling of bevel gear forming", Report No. B-91-13, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, Columbus, OH

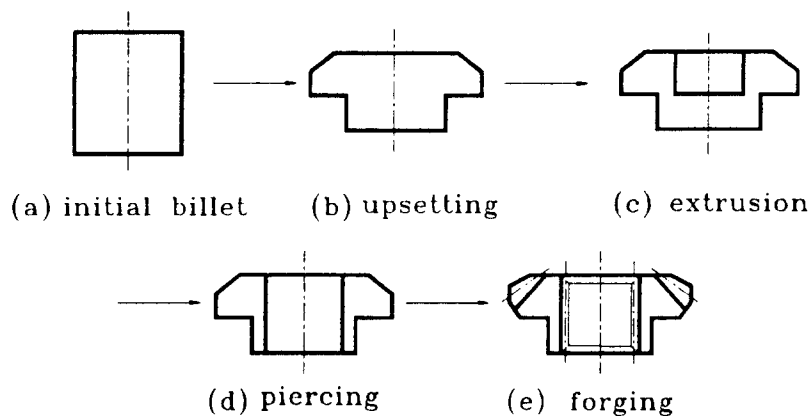


Fig.1 The new suggested processes of cold forging to form differential side gear.

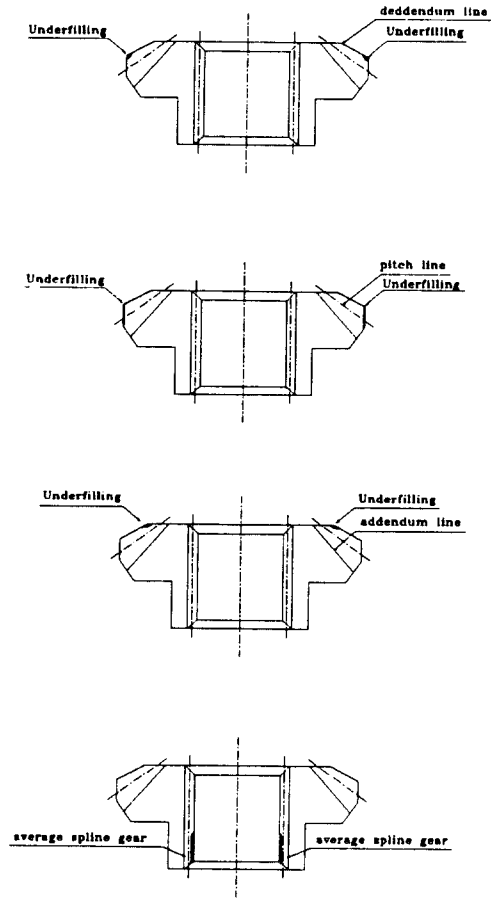


Fig.2 The control of the angle to forge the bevel gear and spline. (a)using the dedendum cone angle (b)using the pitch cone angle (c)using the addendum cone angle (d) spline forging using the pitch cone angle

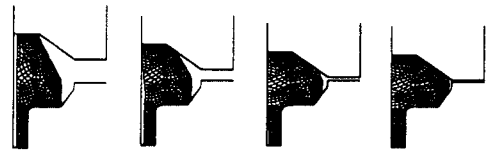
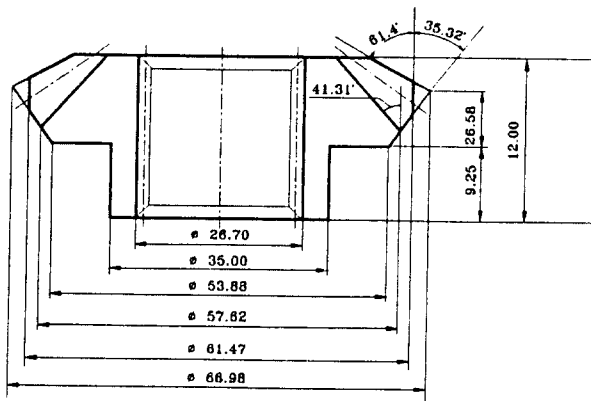


Fig.4 The initial mesh system and loading simulation

Fig.3 The forged differential side gear geometry.

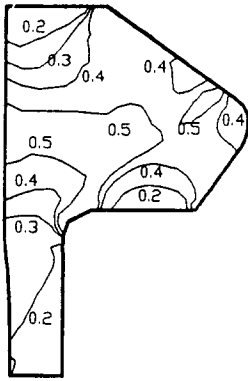


Fig.5 The effective strain distribution

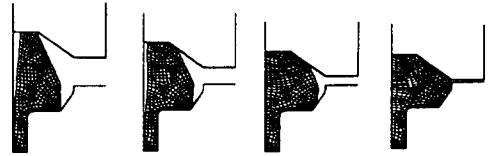


Fig.6 The initial mesh system and loading simulation for the modified preform

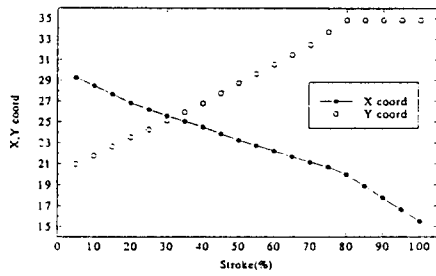


Fig.7 Detaching locus of x and y coordinates for the upper die

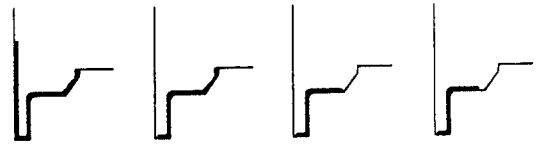


Fig.8 Display of contacting surface (hatched area) between the lower die and workpiece

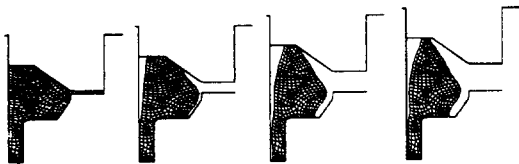


Fig.9 Backward tracing simulation

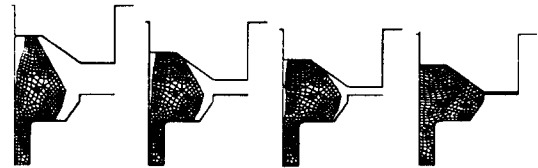


Fig.10 Loading simulation of the final preform derived from backward tracing simulation

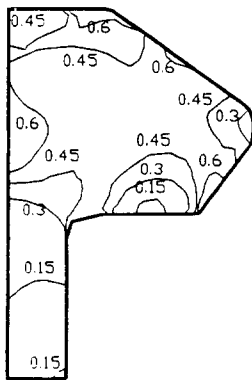


Fig.11 The effective strain distribution

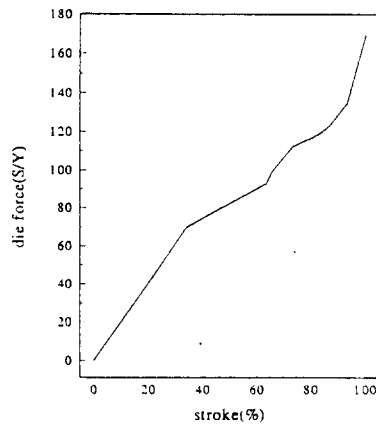


Fig.12 The die force versus stroke