

< 논 문 >

허브 냉간단조품의 공정설계

고대철* · 김병민** · 최재찬** · 오세욱***

(1995년 4월 21일 접수)

Process Sequence Design in Cold Forged Part of Hub

Dae-Cheol Ko, Byung-Min Kim, Jae-Chan Choi and Se-Wook Oh

Key Words : Cold Forged Part(냉간단조품), Process Sequence Design(공정설계), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Defect(결함), Preform(예비성형체)

Abstract

The Hub is an automobile component used as aircon clutch. The important aspects in cold forging of the Hub with complex geometry are the design of an initial shape of the workpiece, the possibility of the forming by one-stage operation and the determination of number of preforms, etc. Based on the systematic procedure of process sequence design, in this paper, the forming operation of cold forged part of the Hub is designed by the rigid-plastic finite element method. The two design criterion of geometrical filling without defect and an even distribution of effective strain in final product are investigated in controlling the initial shape of the workpiece and preform configuration. It is noted that one preforming operation is required in order to obtain final product of the Hub.

1. 서 론

일반적으로 냉간단조공정에서 제조되는 최종 제품은 한 단계의 공정에 의해 생산되는 것이 아니라, 초기의 간단한 소재 형상을 좀 더 복잡하고 결함이 없는 제품으로 만들기 위해서 몇 번의 예비성형공정을 거치는 다단계 성형공정이 수행되어야 한다. 따라서 냉간단조 공정설계의 가장 중요한 사항은 예비성형 횟수 및 예비성형체 설계 등이며, 이를 실제 현장에서는 대부분 경험적 지침, 설계자의 직관 및 실험에 의한 시행착오를 통하여 수행하고 있으므로 시간 소모가 많고 제품단가의 상승을 초래한다. 그러므로 새로운 제품의 생산을 위한 성형

공정의 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여, 실제의 금형 및 공구의 제작 이전에 소재 유동 및 금형내부 채움정도와 성형하중 등의 상세한 정보를 제공할 수 있는 기법들이 필요하다.

최근에는 컴퓨터와 수치기법의 발전으로 컴퓨터를 이용한 여러가지 기법들이 성형공정설계 및 금형설계에 활발히 이용되고 있다.^(1~4) 경험적 지식과 문헌 등을 재고찰하여 수립된 설계규칙을 이용한 성형공정 및 금형설계 시스템은 소재의 유동, 응력 및 변형률 분포 등을 예측할 수가 없는 반면에 유한요소법을 이용한 시뮬레이션으로는 이와 같은 정보들을 상세히 제공할 수 있다.^(5~12) 또한 유한요소법의 가장 실제적인 적용 중의 하나가 다단계 성형공정에 있어서의 공정설계이다.

허브(hub)는 자동차용 부품으로서 에어컨 클러치(Aircon clutch)로 사용되는 제품이다. 이와 같이 복잡한 형상을 지닌 허브의 최종형상에 대하여 적

*회원, 부산대학교 대학원 기계설계공학과

**회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

*** (주) 현대자동차

결한 초기 소재의 결정, 한 단계작업으로의 성형 가능성 및 예비성형공정의 필요성 등이 중요한 공정설계 변수이다. 따라서 본 연구에서는 체계적이고 일반적인 설계방법론을 근거로 강소성 유한요소법을 이용하여 허브 냉간단조품의 공정설계를 수행하고자 한다. 먼저 성형공정에 적용 가능한 초기 소재를 선정하여, 한 단계작업으로 최종 단조형상의 성형 가능성, 재료의 유동과 금형내부 채움의 경향 등을 검토하였다. 이러한 결과로부터 허브 냉간단조품의 단조를 위해서는 한 번의 예비성형이 필요함을 알 수 있었으며, 최종 단조형상으로 성형하는 동안 결함이 없고 바람직한 변형률 분포를 얻을 수 있는 적절한 예비성형체를 예측하였다. 예측된 예비성형체를 이용하여 허브 냉간단조품의 최종 단조형상을 성형하는 공정을 설계하였다.

2. 유한요소 수식화 및 격자 재구성

허브 냉간단조품의 공정설계를 위하여 본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하였으며, 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌^(13,14)에 잘 알려져 있으므로, 여기서는 간략하게 언급한다.

강소성 재료에 대한 범함수(functional), Π 는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_{S_r} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\dot{\epsilon}$ 는 유효변형률속도, \bar{t}_i 는 표면력, v_i 는 절점속도이다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K 를 도입하면, 위의 식 (1)에 대한 일차 변분범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_r} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다.

위의 식 (2)는 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우튼-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

비정상상태의 변형을 주로 다루는 소성가공공정에 대한 유한요소해석의 두드러진 특징 중의 하나

는 초기의 단순한 소재 형상이 해석을 수행하게 되면 복잡한 형상으로 변하고, 국부적으로 집중된 변형이 발생하여 격자구조가 해석에 부적절하게 변하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 격자 재구성을 수행하여 원활한 유한요소해석을 진행하였다.⁽¹⁵⁾ 또한 본 연구에서의 격자 재구성을 판별하는 기준은 한 요소의 금형내부 침입면적과 한 요소의 내각 크기의 허용치이며, 이와 같은 두 가지 기준중에서 어느 한 기준을 만족하면 격자 재구성을 수행하여 해석을 진행하였다.

3. 공정조건 및 공정설계 순서

3.1 공정조건

실제 현장에서 허브생산에 이용되는 소재인 AISI 1020을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이러한 소재에 대해 압축시험을 행하여 다음과 같은 응력-변형률 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 895.11 \bar{\epsilon}^{0.14} (\text{N/mm}^2)$$

소재와 금형 사이의 접촉면에서 마찰을 고려하기 위하여 마찰상수, m 을 0.1로 하였으며, 축대칭 형상이므로 전체형상의 1/2만 해석하였다.

3.2 공정설계 순서

본 연구에서 허브의 최종제품을 냉간단조로 성형하기 위한 공정순서를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저, 실제 자동차용 에어컨 클러치로 사용되는 허브의 기계도면으로부터 최소한의 기계가공을 요구하는 단조도면을 작성한다. 이러한 단조도면 형상으로 성형하기 위하여 다양한 초기 소재 형상을 선정한 다. 기존의 지식을 이용하여 여러 가지 초기 소재 형상의 물리적 타당성을 검증하고, 선정된 초기 소재 형상을 이용하여 단조도면 형상으로 시뮬레이션한다. 시뮬레이션 결과를 검토하여 결과에 만족하면, 예비성형체가 필요없는 한 단계 작업만으로 충분한 공정임을 알 수 있고, 만족하지 못하면 한 단계작업만으로 성형할 수 없다. 따라서 초기 소재 형상과 최종 형상의 중간단계인 예비성형체를 예측한다. 초기 소재를 예측된 예비성형체 형상으로 성형한 후, 예비성형체를 최종 형상으로 성형하는 공정을 거친다. 만약 결과에 만족하지 못하면, 예비성형체를 다시 예측하여 최종 형상으로 성형하는 과정을 반복함으로써 금형내부의 채움이 양호하며

제품의 결함이 없고 바람직한 변형률 분포를 얻을 수 있는 가장 적절한 예비성형체 형상을 선정하여 최종제품으로 성형한다.

4. 허브의 공정설계

4.1 단조도면의 작성

허브 최종제품의 형상 및 기계도면은 Figs. 2, 3에 나타난 바와 같다. 성형시 업셋팅과 압출공정을 동시에 요구하고 있으며, 곡률이 작은 코너부분이 많고 형상이 복잡하므로 냉간단조로서 기계도면의 형상대로 성형하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 최소한의 기계가공을 요구하는 단조도면이 필요하게 된다. Fig. 4는 단조후 기계가공을 최소화시킬 수

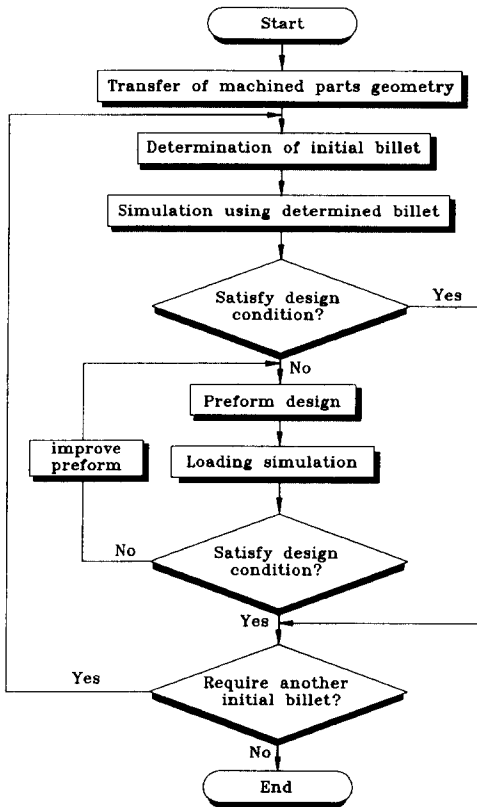


Fig. 1 A schematic flow chart of the design procedure

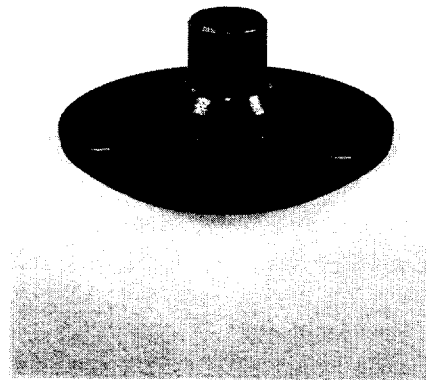


Fig. 2 A photograph of final product

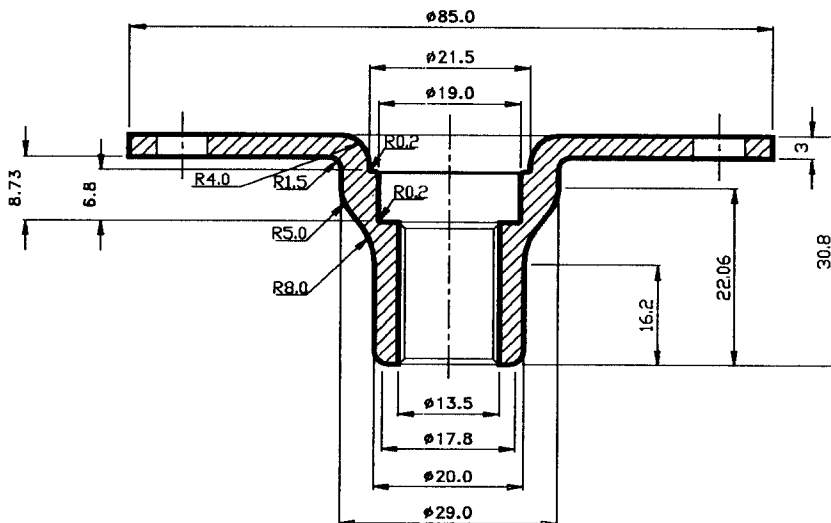


Fig. 3 A drawing of machined section geometry

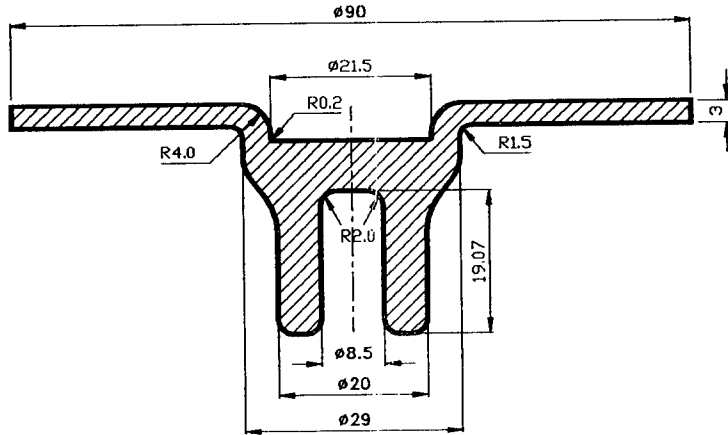


Fig. 4 A drawing of forged section geometry

있는 단조도면을 나타내고 있다. 외형 형상을 기계도면 치수와 같게 하여 기계가공을 줄일 수 있도록 하였으며, 업셋팅공정이 행해지는 끝부분은 일종의 플래쉬부분으로서 트리밍작업을 하기 위하여 기계도면 치수보다 크게 하였다. 압출되는 부분은 성형 중 가공경화에 의한 제품의 강도를 요구하고 있으므로 압출과 업셋팅을 동시에 행하는 방법을 사용하여 압출되는 부분에 가공경화를 받을 수 있도록 하였으며, 내부에 스플라인 브로칭(spline broaching) 작업이 요구되므로 내부직경을 작게 하였다.

4.2 초기 소재의 선정

일반적으로 냉간단조에서 초기 소재의 직경은 최종제품의 직경 중의 하나로 선택한다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서도 단조도면으로부터 직경(ϕ)이 각각 90, 29, 20 mm인 세 가지 초기 소재를 선정하였다. 단조도면에 의한 제품의 체적이 약 30000 mm³이므로 직경이 90, 29, 20 mm인 세 가지 초기 소재에 대한 길이(L)는 각각 5, 50, 100 mm이다.

$\phi 90 \times L5$ 인 초기 소재는 압출공정만 이루어지므로 물리적으로 거의 불가능하며, $\phi 20 \times L100$ 인 초기 소재는 직경 대 길이의 비가 2.5보다 훨씬 커서 성형 중에 좌굴이 발생하므로 부적절한 초기 소재형상임을 알 수 있다.⁽¹⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 $\phi 29 \times L50$ 인 초기 소재를 이용하였다. 또한 최종제품의 직경은 아니지만 $\phi 40 \times L27$ 인 임의의 초기 소재를 선택하여 성형 가능성을 검토하였다.

4.3 초기 소재의 시뮬레이션

한 단계작업으로 최종 단조형상의 성형 가능성,

재료의 유동과 금형내부 채움의 경향 등을 알아보기 위하여 선정된 초기 소재에 의한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 $\phi 29 \times L50$ 인 초기 소재를 이용하여 최종 단조도면 형상으로 성형하였으며, 초기 소재 형상과 성형중인 소재형상을 Fig. 5(a)에 나타내

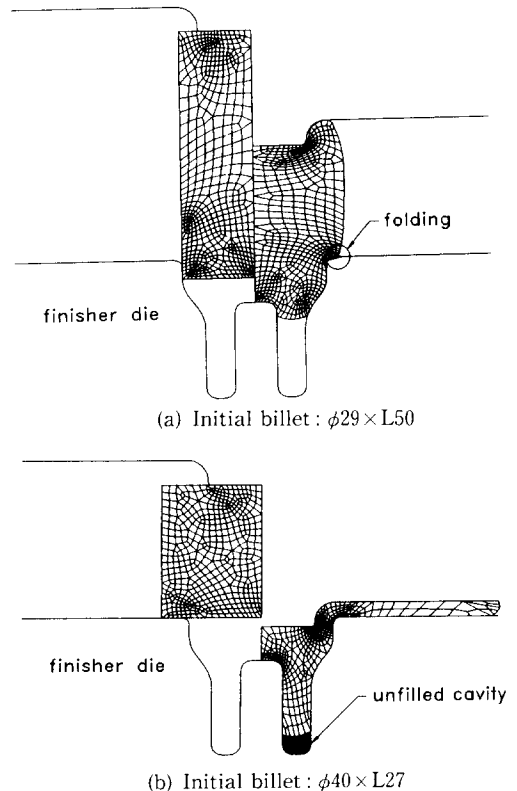


Fig. 5 Deformed mesh, folding formation and unfilled cavity of forging process

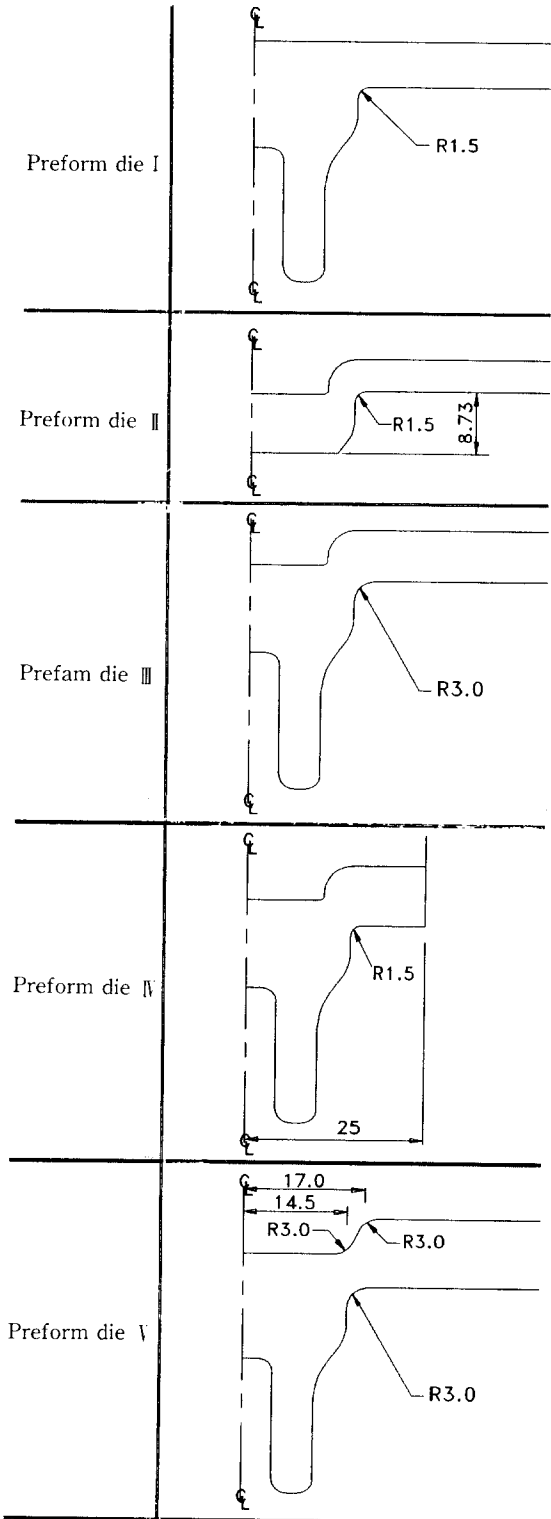


Fig. 6 Dimensions and configurations of preform dies

있다. 소재 유동이 상·하로 동시에 일어나고 있으며, 공정이 진행함에 따라 업셋팅과 비구속 전방압출이 동시에 행해진다. 압출되는 부분의 급격한 단면적 감소로 인해 소재의 유동이 억제되므로 비구속 압출시 금형 입구에서 나타나는 벌징현상에 의해 업셋팅되는 부분과 서로 겹쳐버리는 폴딩(folding)현상이 발생함을 알 수 있다.

최종 제품의 직경이 아닌 임의의 초기 소재에 대하여 성형 가능성을 검토해 보았다. Fig. 5(b)에서 나타낸 바와 같이 $\phi 40 \times L27$ 인 초기 소재를 사용하여 한 단계작업만으로 최종 단조도면 형상으로 성형하였다. 이 경우 $\phi 29 \times L50$ 인 초기 소재를 이용한 공정의 경우에서 발생하였던 폴딩현상은 일어나지 않았지만, 소재의 유동속도가 압출되는 것보다 업셋팅되어 반경방향으로 빠져나가는 속도가 훨씬 빠르므로 압출되는 부분에서 금형내부를 완전히 충전시키지 못하는 결함이 발생하였다. 따라서 $\phi 29 \times L50$ 과 $\phi 40 \times L27$ 인 초기 소재를 이용한 시블레이션으로부터 한 단계작업만으로 최종 단조도면 형상으로 성형하는 것은 불가능하며, 중간단계인 예비성형공정이 요구됨을 알 수 있다.

4.4 예비성형체 설계

금형내부의 채움이 양호하며 제품의 결함이 없고 바람직한 변형률 분포를 얻을 수 있는 적절한 예비성형체를 얻기 위하여, 먼저 $\phi 29 \times L50$ 인 초기 소재를 이용하여 예비성형체 설계를 수행하였다. $\phi 29 \times L50$ 인 초기 소재의 시블레이션에서 벌징현상으로 인해 나타나는 폴딩현상을 없애기 위하여 상부금형의 형상을 Fig. 6의 예비성형용 금형 I과 같이 소재의 상부 유동을 없애는 평금형으로 바꾸어

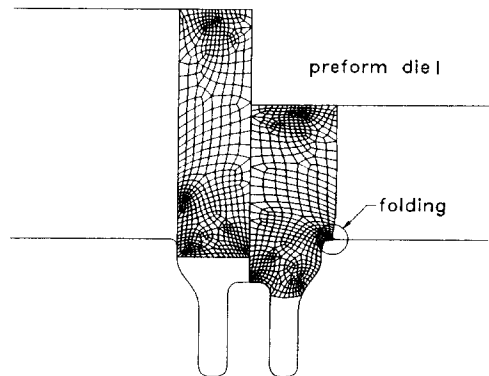


Fig. 7 Deformed mesh and folding formation of forging process using designed preform die I

비구속 압출형식으로 시뮬레이션을 행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞서 Fig. 5의 결과와 마찬가지로 압출되는 부분의 단면적 감소가 급격히 커짐으로써 압출되는 부분의 소재 유동이 느려지고, 동시에 비구속 부분에서 폴딩이 일어남을 볼 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 폴딩으로 인한 제품의 결함을 방지하기 위해서는 상부금형의 형상은 무관하며, 하부금형의 형상을 적절히 설계해야 함을 알 수 있다.

압출되는 부분의 급격한 단면적 감소로 인해 소재의 유동이 구속되므로 압출부의 입구 부분에서 폴딩현상이 발생함을 볼 수 있었다. 따라서 하부금형의 형상을 Fig. 6의 예비성형용 금형 II와 같이 수정하여, 압출되는 부분의 소재체적을 제한하였다. 반경방향으로 엷어지는 소재의 유동을 자유롭게 함으로써 Fig. 8(a)와 같이 앞서 발생하였던 폴딩현상을 없앨 수 있었다. 이와 같은 예비성형체를 이용하여 최종 단조도면 형상으로 성형하였다. Fig. 8(b)에 나타낸 바와 같이 소재가 겹쳐지는 폴딩 현상은 없앨 수 있었지만, 압출되는 소재의 유동속도보다 엷어짐되어 반경방향으로 나가는 소재

의 유동속도가 훨씬 빠르므로 금형내부를 완전히 채우지 못하였다.

금형내부의 채움이 양호하며 제품의 결함을 방지할 수 있는 예비성형체를 구하기 위해 앞서의 시뮬레이션 결과들을 기초로 하여 다음과 같은 예비성형체 형상을 예측할 수 있다. 금형내부를 완전히 충전시켜주기 위하여 어느 정도의 압출된 양이 필요하고 또한 폴딩결함없이 그러한 양만큼 압출해야 한다. 따라서 하부금형의 형상을 Fig. 6의 예비성형용 금형 III과 같이 곡률을 두배로 크게 수정하였다. 하부금형의 곡률을 크게 함으로써 Fig. 9(a)와 같이 폴딩으로 인한 제품의 결함을 없앨 수 있었으며, 금형내부를 충전시키기 위한 압출량을 적절하게 성형한 예비성형체를 만들 수 있었다. Fig. 9(a)와 같은 예비성형체를 이용하여 최종 단조도면으로 성형한 결과, Fig. 9(b)에서 나타낸 바와 같이 금형내부를 충전시킬 수 있는 완전한 제품을 성형할 수 있었다.

앞서 $\phi 29 \times L50$ 인 소재를 이용한 시뮬레이션 결과를 기초로 하여 $\phi 40 \times L27$ 인 초기 소재에 대한 예비성형체를 예측할 수 있다. 엷어짐되어 반경

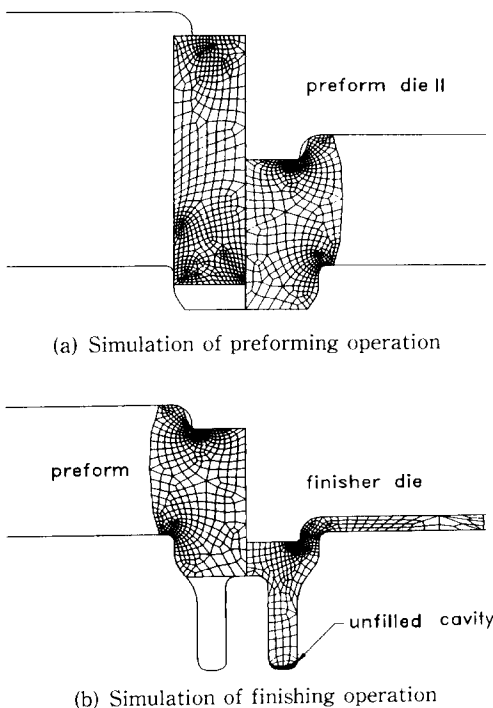


Fig. 8 Simulation of the entire forging process using designed preform die II and preform

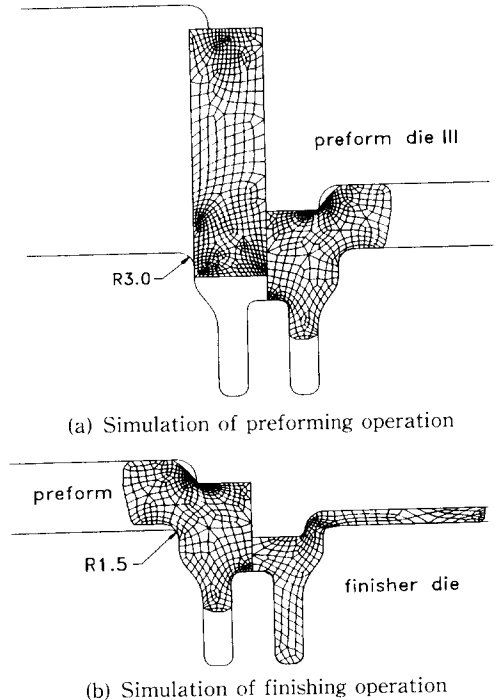


Fig. 9 Simulation of the entire forging process using designed preform die III and preform

방향으로 빠져나가는 소재의 유동을 억제시키고 금형내부를 충만시킬 수 있도록 압출부를 미리 성형시키는 예비성형체를 설계하였다. 이러한 예비성형체를 성형하기 위한 하부금형 형상은 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅳ와 같다. 성형중에 업셋팅에 의해 반경방향으로 빠져나가는 소재의 유동을 억제시켜 소재 유동을 압출되는 방향으로 유도하여 Fig. 10(a)와 같은 예비성형체를 설계하였다. 성형된 예비성형체를 최종 단조도면 형상으로 성형하였으며, Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이 금형내부를 완전히 충만시키는 제품을 얻을 수 있었다.

4.5 개선된 예비성형체 설계

폴딩이 없는 금형내부의 완전한 충만뿐만 아니라 바람직한 변형률 분포와 단조하중 측면에서 앞서 설계된 예비성형체의 개선 가능성을 검토해 보았다. Fig. 11은 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ, Ⅳ를 사용하였을 경우에 대한 예비성형체의 유효변형률 분포를 나타내고 있다. 소재의 윗 부분이 업셋팅되어 반경방향으로 빠져나가면서 많은 변형을 받고

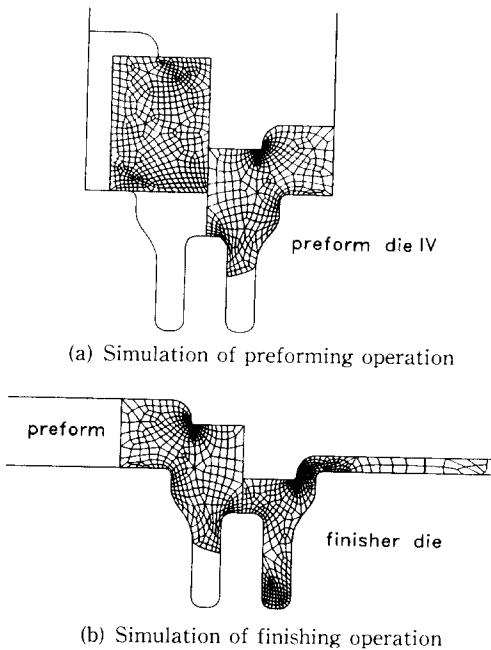


Fig. 10 Simulation of the entire forging process using designed preform die IV and preform

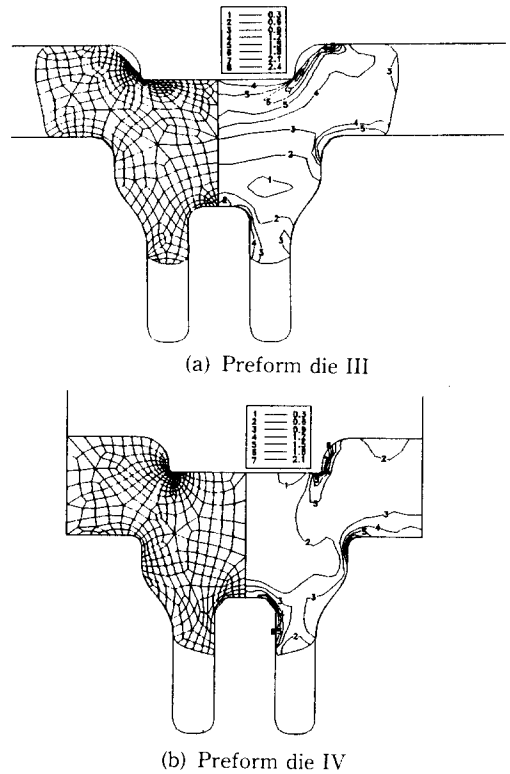


Fig. 11 Distribution of effective strain within preform

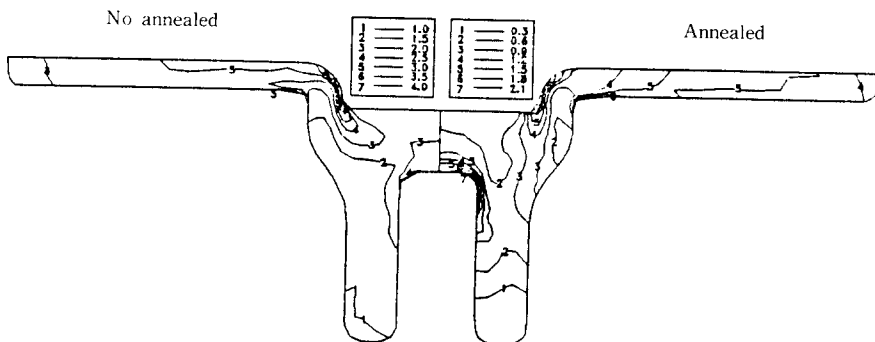


Fig. 12 Distribution of effective strain within final forging (preform die III applied to initial billet)

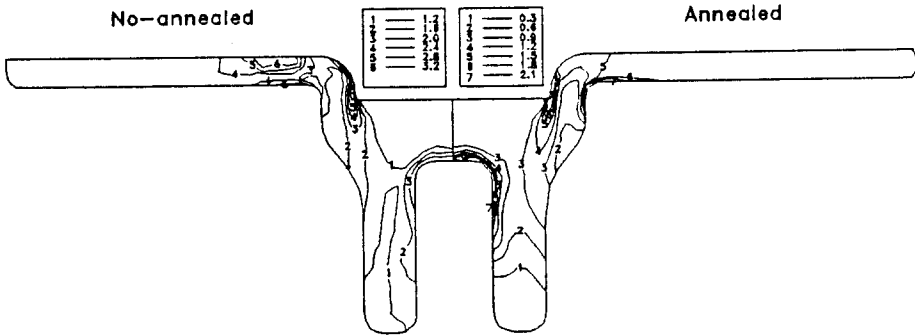


Fig. 13 Distribution of effective strain within final forging (preform die IV applied to initial billet)

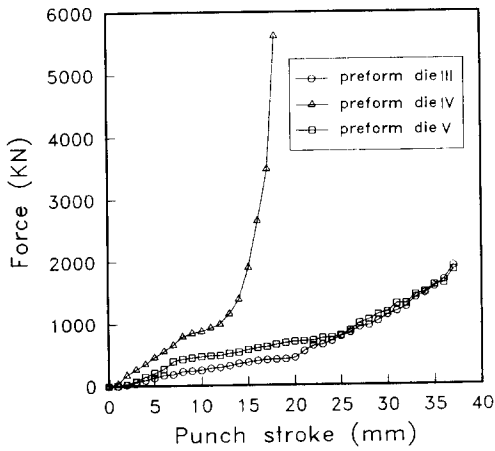


Fig. 14 Variation of forging load as preform dies applied to initial billet

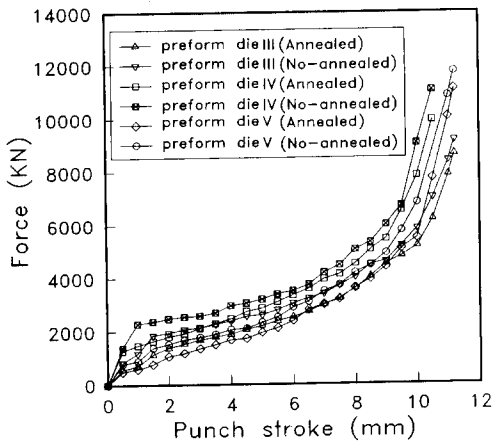
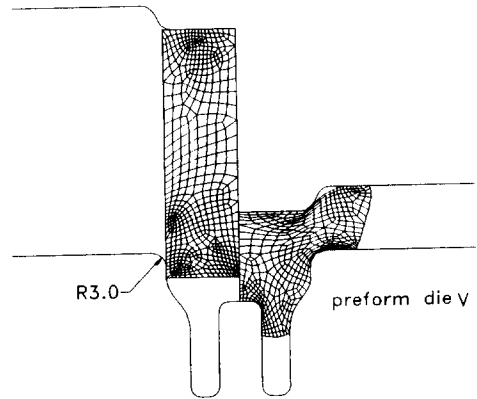
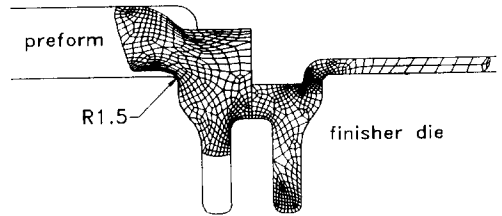


Fig. 15 Variation of forging load as finisher die applied to designed preforms



(a) Simulation of preforming operation



(b) Simulation of finishing operation

Fig. 16 Simulation of the entire forging process using designed preform die V and preform

있음을 알 수 있고, 상부금형의 예리한 라운더 부분에서 상대적으로 큰 변형이 이루어짐을 알 수 있다.

Figs. 12, 13은 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ, Ⅳ로 성형한 예비성형체를 최종 단조도면 형상으로 성형할 때 소재의 유효변형률 분포를 나타내고 있다. 두 공정 모두에서 소재를 어닐링하지 않은 경우가 상당히 큰 변형을 받으므로, 예비성형체를 성형한

후 어닐링과정이 필요함을 알 수 있다.

Figs. 11~13의 결과로부터 예비성형체를 성형하는 동안 소재의 큰 변형으로 인해 예리한 라운더 부분의 표면에 크랙이 발생할 가능성이 상당히 높으므로 이러한 소재의 변형을 제어해 줄 필요가 있음을 알 수 있다. 또한 최종 단조도면으로 성형하기 전에 어닐링과정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Figs. 14, 15는 예비성형체와 최종제품을 성형할 때 펀치 스트로크에 대한 하중 곡선을 나타내고 있다. Fig. 14에 나타낸 바와 같이 예비성형체 성형시 하중은 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ의 경우 압출과 업셋팅이 동시에 이루어져 작은 하중이 작용하지만, Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅳ의 경우는 업셋팅되어 반경방향으로 빠져나가는 유동을 억제함으로써 상당히 큰 단면적 감소율로 구속압출하는 것이 되므로 큰 하중이 작용하고 있다. 최종제품에 대한 하중은 전체적으로 비슷하게 나오고 있으며

압출되는 부분의 금형내부를 완전히 채운 후에는 업셋팅만 일어나므로 하중곡선이 급상승하고 있음을 Fig. 15에서 알 수 있다.

Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ, Ⅳ를 이용한 시뮬레이션 결과로부터 단조하중과 작업의 편의성을 고려해 볼 때 $\phi 40 \times L27$ 인 초기 소재를 사용하는 것보다 $\phi 29 \times L50$ 인 초기 소재를 사용하는 것이 더 나은 공정임을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ을 이용한 예비성형체 성형시, 유효 변형률이 보다 바람직하게 분포하기 위해서는 예비성형체의 개선이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅴ와 같은 형상의 금형을 이용하여 개선된 예비성형체를 성형하였다.

Fig. 16(a), (b)는 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅴ로 예비성형체를 성형한 후, 최종 제품으로 성형하였을 때의 소재 유동을 나타내고 있으며, 폴딩현상없이 금형내부를 완전히 충만시키는 최종 단조도면

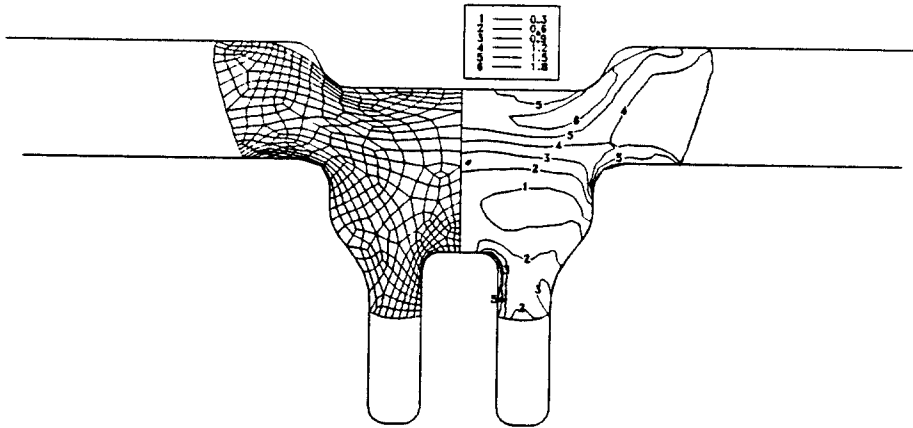


Fig. 17 Distribution of effective strain within preform using preform die V

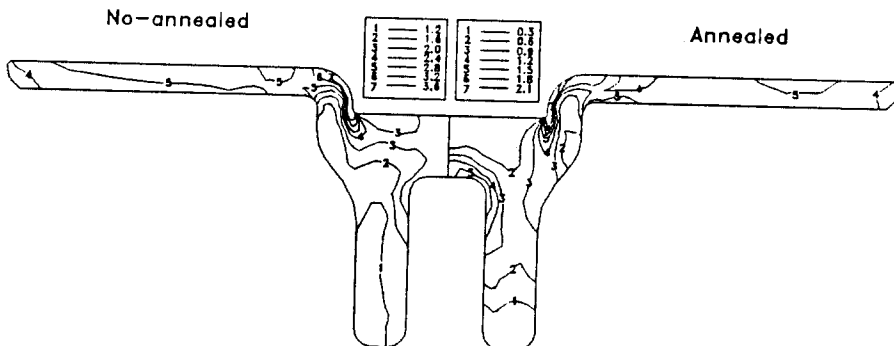


Fig. 18 Distribution of effective strain within final forging(preform die V applied to initial billet)

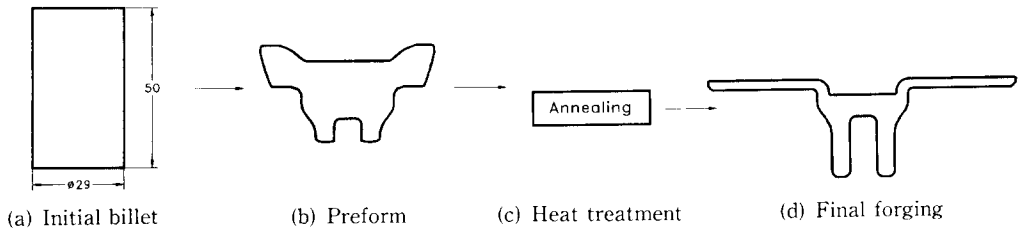


Fig. 19 Process of cold forging to form a Hub

형상으로 성형시킬 수 있었다. Figs. 14, 15에서 예비성형체와 최종 제품을 성형할 때 펀치 스트로크에 대한 하중 곡선은 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ을 이용한 공정과 비슷하지만, 예비성형체의 유효변형률 분포를 나타낸 Fig. 17과 최종제품의 유효변형률 분포를 나타낸 Fig. 18에서 Fig. 6의 예비성형용 금형Ⅲ을 이용한 공정보다 유효변형률 분포가 비교적 균일하다. 또한 Fig. 18에 나타낸 최종 제품의 유효변형률 분포에서 볼 수 있듯이, 이와 같은 경우에도 바람직한 유효변형률 분포를 얻기 위해서는 어닐링 과정을 거친 후 예비성형체를 이용해서 최종제품으로 성형하는 것이 가장 적절한 공정임을 알 수 있다.

이상과 같은 본 연구의 강소성 유한요소 시물레이션 결과로부터, 허브 냉간단조품의 단조를 위해 설계된 공정은 Fig. 19와 같다.

5. 결 론

유한요소법을 이용한 금속성형 공정설계 및 예비성형체 설계를 위하여 체계적이고 일반적인 설계방법론을 근거로 자동차용 에어컨 클러치로 사용되는 허브의 냉간단조 공정설계를 행하였다. 결함이 없는 소재 유동, 바람직한 변형률 분포와 단조하중 등을 고려하여 예비성형체를 설계하였다. 허브 냉간단조품의 단조를 위해서는 예비성형용 금형Ⅴ를 사용하여 예비성형체를 성형하고, 이러한 예비성형체를 어닐링과정을 거친 후 최종 단조도면 형상으로 성형하는 공정이 가장 적절함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Sevenler, K., Raghupati, P. S. and Altan, T., 1987, "Forging Sequence Design for Multistage Cold Forging," *J. of Mech. Work. Tech.*, Vol. 14, pp. 121~135.
- (2) Osakada, K., Kado, T. and Yang, G. B., 1988, "Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forging," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp. 239~242.
- (3) Bariani, P. and Knight, W., 1988, "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.
- (4) Vemuri, K. R., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "BID: A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 29, No. 4, pp. 505~518.
- (5) Park, J. J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "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.
- (6) Hwang, S. M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform Design in Disk Forging," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 26, No. 3, pp. 231~243.
- (7) Yang, D. Y. and Kim, K. H., 1988, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Ring Rolling," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 30, No. 8, pp. 571~580.
- (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) Kim, N. S. and Kobayashi, S., 1990, "Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the Finite Element Method," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, No. 2, pp. 243~268.
- (10) Kang, B. S. and Kobayashi, S., 1991, "Preform Design in Ring Rolling Processes by the Three-Dimensional Finite Element Method," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, No. 1, pp. 139~151.
- (11) Kang, B. S., 1991, "Process Sequence Design in a Heading Process," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 27, pp. 213~226.
- (12) Altan, T. and Knoerr, M., 1992, "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 35, pp. 275~302.
- (13) Zienkiewicz, O. C., 1977, *The Finite Element Method*, 3rd Edition, McGraw-Hill, UK.
- (14) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and The Finite Element Method," Oxford University Press.
- (15) Oh, S. W., 1995, "Finite Element Analysis of Piping Defect in Axisymmetric Forward Extrusion," MS Thesis, Pusan National University.
- (16) American Society for Metals, 1969, "Metals Handbook 8th Edition," *ASM, Metals Park, Ohio 44073*, Vol. 4 Forming, p. 485.