

토크 컨버터용 임펠러 허브의 냉간단조공정설계

김영석*, 김현수**, 김찬일**, 최석탁***

Design of a Impeller Hub Cold Forging Process

Young Suk Kim*, Hyun Soo Kim**, Chan Il Kim**, and Suk Tak Choi***

ABSTRACT

A impeller hub is usually made through three forging processes : forward extrusion, upsetting and finishing. The finishing process is closed die forging in which the load increases abruptly at the final stage, resulting in underfilling in the finished product due to insufficient load capacity of the press. In this study, the rigid-plastic finite element analysis was applied to the impeller hub forging process in order to optimize process and to estimate required load. As a result, two kind of improvements for the process were suggested to reduce the load requirement in the finishing process.

Key Words : Finite Element Method(유한요소법), Cold Forging(냉간단조), Forward Extrusion(전방압출), Upsetting(엷셋팅), Piercing(피어싱), Backward Extrusion(후방압출)

1. 서 론

냉간단조공정시 금형내의 소재유동은 금형의 형상, 그리고 금형과 소재간의 마찰로 인하여 복잡하게 진행된다. 특히 금형 설계(die design)와 소재의 예비성형체(preform)형상이 정확하지 않으면 단조시 작용하는 과다하중으로 인해 금형과 프레스의 손상이나 최종형상이 원하는 형상과 불일치하게 되는 미충진(underfill) 또는 겹침(lap)결함이 발생하게 된다.^[1] 따라서 이러한 가능성을 줄이거나 없애기 위한 적절한 공정개선안이 요구되는데, 과거에는 경험에 의하여 이루어졌으나 근래에는 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)을 사용하여 이루어지고 있다.^[2-6] 본 연구에서는

자동차의 자동변속기에 장착되는 토크 컨버터용 임펠러 허브(impeller hub)의 냉간단조공정을 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하고 두 가지의 공정개선안을 제안하였다. 이러한 임펠러 허브의 성형방법은 전방압출(forward extrusion), 엷셋팅(upsetting), 피어싱(piercing) 및 피니셔(finisher)공정의 순으로 되어 있다. 특히 최종공정인 피니셔공정은 폐쇄단조에 해당되고, 이 공정에서 단조하중은 플래시를 형성하면서 급격히 증가한다. 그러나 실제 단조공정에서는 단조기의 부하한계때문에 자주 최종제품에 미충진결함, 겹침결함 등이 발생하여 종종 손실을 가져올 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 강소성 유한요소해석 전용 DEFORM Software^[7]를 활용하여 전체 냉간단조공정에 대한

* 경북대학교 기계공학부 (E-mail : caekim@knu.ac.kr)

** 경북대학교 기계공학부 대학원

*** ㈜ 우진공업

해석을 수행하였고 이를 기본으로 하여 최종 피니셔공정에서의 단조하중을 줄이고 결함을 없앨 수 있는 공정 개선안을 제시하였다.

2. DEFORM S/W 의 적용 이론식

소성가공 전용 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 DEFORM software 는 다음과 같은 강점소성식을 사용하고 있다.

$$\text{평형 방정식 : } \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{적합 방정식 : } \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2) \\ \dot{\epsilon}_v &= u_{i,i} = 0 \end{aligned}$$

$$\text{구성 방정식 : } \sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \bar{\sigma} &= \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})} \\ \dot{\epsilon} &= \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건 : } \sigma_{ij}n_j &= F_j \quad \text{on } S_F \quad (4) \\ u_i &= U_i \quad \text{on } S_U \end{aligned}$$

여기서 σ_{ij} 와 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 변형재료의 응력과 변형률 속도를 나타내고 $\bar{\sigma}$ 와 $\dot{\epsilon}$ 는 각각 재료의 유효응력과 유효변형률 속도를 나타내고, F_j 는 재료의 경계면에 걸리는 힘을, U_i 는 경계에서의 변형속도를 나타낸다.

(1)~(4)식에 변분법을 적용하여 다음과 같은 약형(weak form)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_V \left(\frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\epsilon}} \right) \delta\dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_{ik} \delta\dot{\epsilon}_{ik} dV \\ - \int_{S_F} t_i \delta u_i dS = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

V 와 S 는 각각 체적과 표면적을 나타내고, K 는 패널티 상수를 나타낸다.

3. 기존 단조공정

토크 컨버터용 임펠러 허브의 성형에 사용되는 소재는 SCR420H 이며, 해석에 필요한 물성치를 구하기 위하여 환봉에 대한 압축실험을 수행하였다. 압축실험에서 얻어진 압축응력-변형률 선도를 Fig. 1 에 나타내었다. 유한요소해석에서 사용한 마찰계수는 일정단단마찰(constant shear friction)의 m 값으로 0.1 을 채택하였다. 실제 성형실험에 사용한 프레스의 최대용량은 650ton 이다.

기존의 실제성형공정은 Fig. 2 에서 나타낸 것과 같이 전체 5 공정으로 구성되어 있다. 우선 원형 봉을 자른 후 열처리 공정을 수행한다. 전방압출 및 옆셋팅공정을 통하여 예비성형체로 가공되며, 가공경화로 인한 국부적인 응력집중을 방지하기 위하여 각각의 공정후 열처리 과정을 거치게 된다. 그리고 피어싱공정을 통해 홀을 형성시키고 열처리를 한 후, 단조공정중 마지막인 피니셔공정을 거친 후 기계가공공정을 통해 부품으로 완성된다. 본 연구에서는 전방압출, 옆셋팅 및 피니셔공정을 등온(isothermal) 냉간단조공정으로 유한요소해석을 하였으며, 피어싱공정과 기계가공공정은 해석대상에서 제외시켰다.

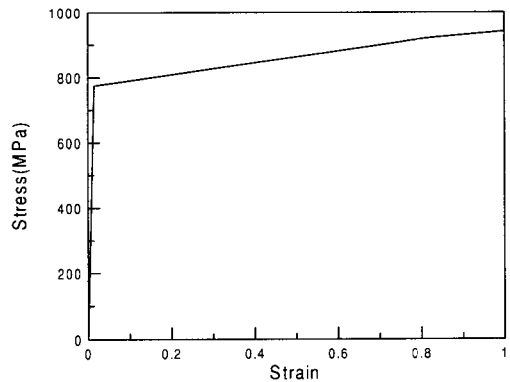


Fig. 1 Stress vs. strain curve for the SCR420H from the compression test

4. 기존공정의 유한요소해석

4.1 전방압출공정

전방압출공정 전후 소재의 유동현상을 Fig. 3 에 도시하였다. 변형률 분포는 성형말기에 소재의 A 부위에 높은 값이 분포되어 있었으며, B 부위와 큰 차이를 보였다. 최대하중은 3.6MN(약 370 ton) 이었다.

4.2 옆셋팅공정

전방압출공정의 유한요소해석 결과를 이용하여 옆셋팅공정에 대한 해석을 수행하였으며, Fig. 4 에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 공정중에 소재 윗부분은 옆셋팅이 되고 아래부분에서는 발의 길이가 늘어나고 두께가 증가하는 등 원하는 형상을 얻을 수 있었다(Fig. 4(b)). 변형률 분포는 소재에 가해진 소성변형에 의해 높은 변형률 값이 고무 분포되어 있었으며, 이는 전 부분에 걸쳐 가공 경화가 진행되었음을 의미하고 있다. 단조하중의 최대값은 5.4MN(약 555 ton)으로 나타났다.

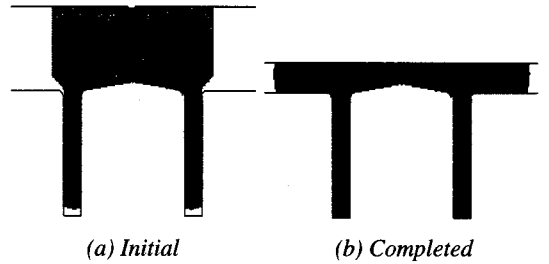


Fig. 4 Loading simulation for the upsetting operation (Present)

4.3 피니셔공정

Fig. 5 에 나타나 있듯이 옆셋팅공정 후 소재의 (C-D)부분을 피어싱했다고 가정하고, 피니셔공정의 해석을 수행하였다. 그 결과 E부위에 미충진 결함이 생긴 것을 알 수 있다(Fig. 6(b)). 본 공정의 해석시에 플래시가 생기기 시작하면서부터 단조하중이 급격히 증가하였다. 최대하중은 6.3MN(약 640 ton)이었다. 기존의 피니셔공정은 프레스의 유효하중용량(약 537~560 ton)을 초과하는 하중을 필요로 함을 알 수 있다.

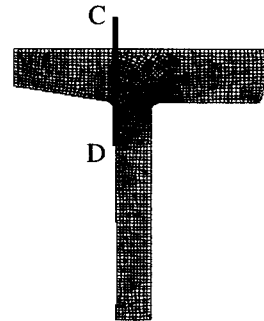


Fig. 5 Location of piercing position (Present)

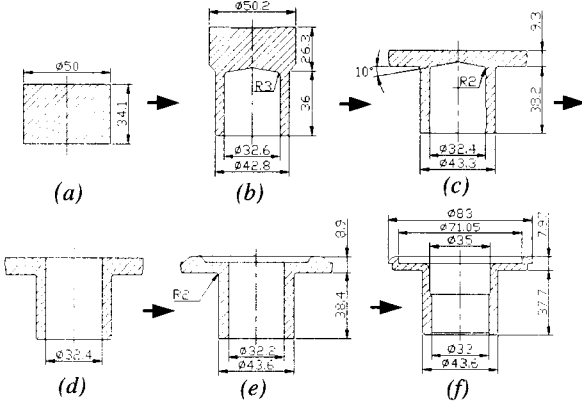


Fig. 2 Schematic description for the forming sequence process of the impeller hub (Present) : (a) Bar Cutting, (b) FWD Extrusion, (c) Upsetting, (d) Piercing, (e) Finisher, (f) Machining

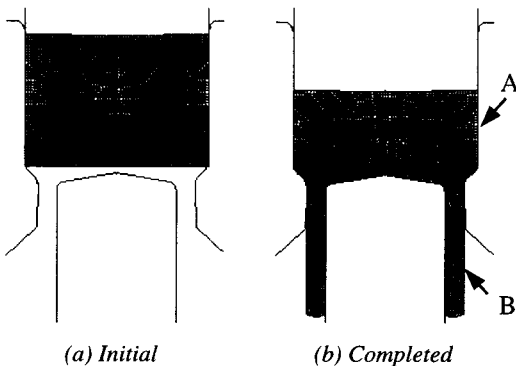


Fig. 3 Loading simulation for the FWD extrusion operation (Present)

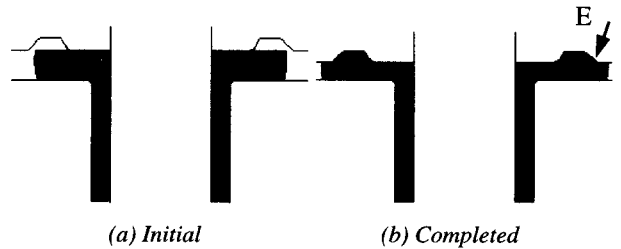


Fig. 6 Loading simulation for the finisher operation (Present)

그러므로 프레스나 금형에 과다하중에 의한 무리가 가해지는 문제점이 발생함을 알 수 있다. Fig. 7은 기존단조과정에서의 각 공정의 단조 하중곡선이며, Fig. 8는 초기 소재와 위의 단조방법을 사용하여 생산된 소재의 외관을 나타낸다.

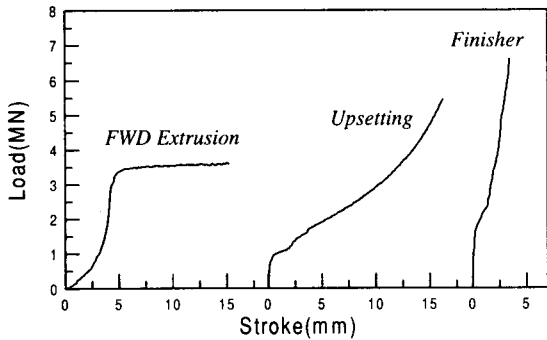


Fig. 7 Load-stroke curves (Present)

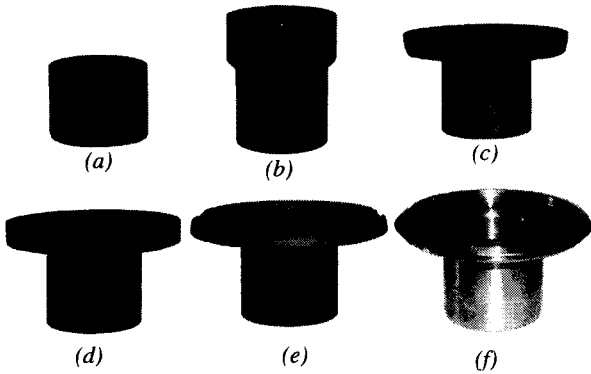


Fig. 8 Products through the completed forming sequence process (Present) : (a) Bar Cutting, (b) FWD Extrusion, (c) Upsetting, (d) Piercing, (e) Finisher, (f) Machining

5. 단조공정의 개선

위에서 수행한 유한요소해석의 결과를 이용하여 아래와 같은 두 가지의 공정개선안을 제안하였다.

5.1 공정 개선안 I

단조하중을 감소시키기 위한 첫 번째 공정개선안은 소재의 초기높이를 31.7mm로 줄이는 방법

이다. 기존의 피니셔공정에서는 소재의 과다부피로 인해 빨리 형성된 플래시가 전체적인 압축력을 증가시키는 작용을 하기 때문에, 공정 개선안 I에서는 초기소재의 부피를 줄이는 방법을 선택했고, 위에서 제시한 소재를 사용하여 다시 유한요소해석을 수행하였다. 전방압출, 엷셋팅 및 피니셔공정의 금형은 기존의 것을 그대로 사용하였다. Fig. 9에 나타낸 피니셔공정의 해석결과를 보면 플래시가 기존 단조공정시보다 덜 증가하여 단조하중이 5.4MN(약 550 ton)으로서 단조기의 유효하중용량을 넘지 않음을 알 수 있다. 그러나 F부위의 미충진 결함은 없어지지 않았다. Fig. 10은 공정 개선안 I의 각 단조공정에서의 펀치행정에 따른 하중곡선을 나타낸다.

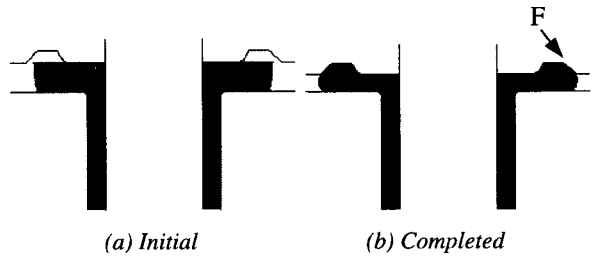


Fig. 9 Loading simulation for the finisher operation(Improvement I)

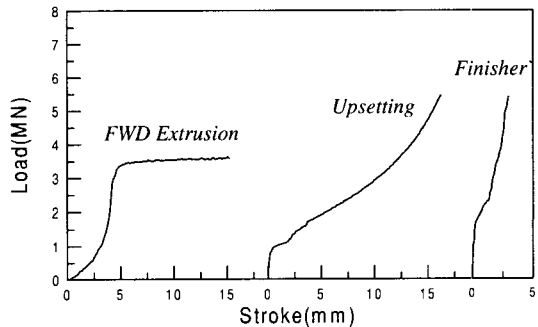


Fig. 10 Load-stroke curves (Improvement I)

5.2 공정 개선안 II

두 번째 공정개선안은 전방압출, 엷셋팅 및 피니셔공정의 금형 형상을 수정하는 방법이다. 공정 개선안II의 공정도를 Fig. 11에 도시하였다. 실제 기존의 전방압출공정시에 금형하중이 높아 상대펀치(counter punch)가 파괴되는 등의 문제점이 있었다. 따라서 초기 소재의 직경과 금형의 직경을 줄

이고 상대편치의 형상을 변경하였다(Fig. 11). 그 결과 전방압출시의 단조하중이 3MN(약 305 ton)으로 기존공정에 비해 약 18%의 단조하중의 감소를 나타내었다. Fig. 12는 공정개선안Ⅱ의 전방압출공정의 시뮬레이션 결과이다. 전방압출공정의 해석 결과를 이용하고 옆셋팅공정의 금형을 수정하여 옆셋팅공정의 해석을 수행하였다(Fig. 11, Fig. 13). 금형을 수정함으로써 피어싱되는 부분의 부피를 줄일 수 있었고, 옆셋팅공정시의 단조하중이 5MN(약 510 ton)으로 약 9%의 단조하중을 감소시킬 수 있었다. Fig. 13의 옆셋팅공정후의 소재에서 피어싱하였다고 가정하고, 피어싱된 소재와 수정된 금형으로 피니셔공정의 해석을 수행하였다(Fig. 11, Fig. 14).

성형이 끝났을 때 요구되는 제품의 형상을 얻을 수 있었고, 금형의 아래 발부분의 금형에 소재가 완전히 충전되는 결과를 얻을 수 있었다. 피니셔공정을 폐쇄단조가 아닌 후방압출(backward extrusion)로 변경함으로써 플래시에 의한 과다하중을 없앨 수 있었고, 그 값은 최대하중이 5.2MN(약 535 ton)으로 유효하중용량을 넘지 않았다. 그리고

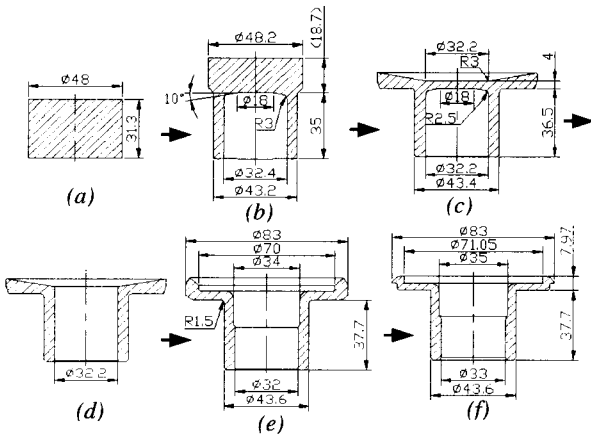


Fig. 11 Schematic description for the forming sequence process of the impeller hub (Improvement II) : (a) Bar Cutting, (b) FWD Extrusion, (c) Upsetting, (d) Piercing, (e) Finisher, (f) Machining

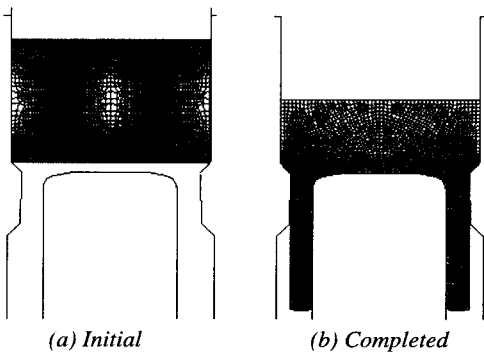
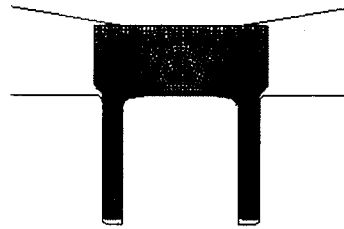


Fig. 12 Loading Simulation for the FWD extrusion operation (Improvement II)

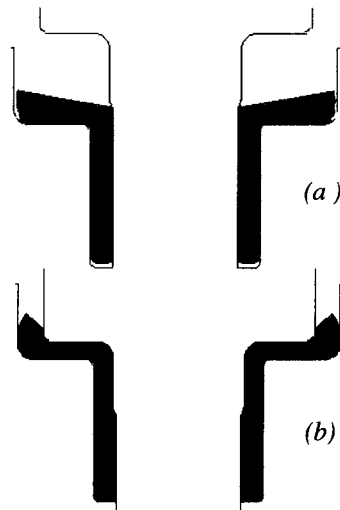


(a) Initial



(b) Completed

Fig. 13 Loading Simulation for the upsetting operation (Improvement II)



(a) Initial

(b) Completed

Fig. 14 Loading Simulation for the finisher operation (Improvement II)

초기소재의 부피를 기존단조공정보다 약 17% 줄일 수 있었다. Fig. 15 에 공정 개선안II의 경우에 해당하는 각 단조공정에서의 단조하중곡선을 도시하였다.

본 피니셔공정에서의 최대하중은 5.2MN(약 535 ton)으로 기존 단조공정에서의 피니셔공정 하중에 비하면 약 17%, 공정개선안 I의 피니셔공정 하중에 비하면 약 3%의 하중감소를 나타내었다. 실험을 통하여 해석의 결과가 비교 및 검증되었으며 각 공정별로 성형된 실제 제품은 Fig. 16 에 나타내었다.

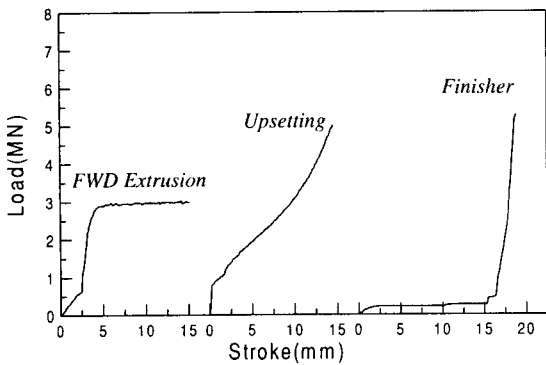


Fig. 15 Load-stroke curves (Improvement II)

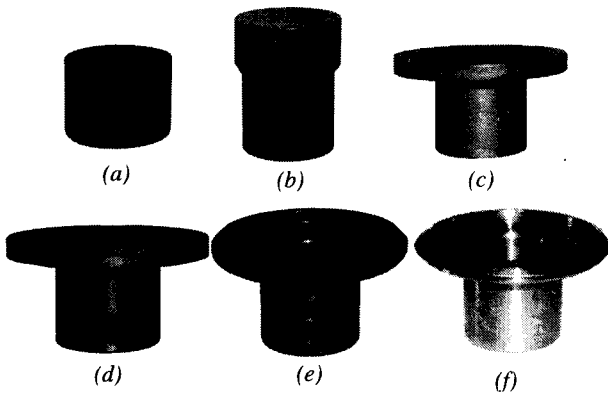


Fig. 16 Products through the completed forming sequence process (Improvement II) : (a) Bar Cutting, (b) FWD Extrusion, (c) Upsetting, (d) Piercing, (e) Finisher (f) Machining

6. 결론

토크 컨버터용 임펠러 허브의 냉간단조공정을

강소성 유한요소법을 사용하여 해석하였다. 이를 통하여 기존의 냉간단조공정에서의 과다 하중에 의한 성형결함을 예측할 수 있었다. 그러므로 이를 해결하기 위한 두 가지의 공정 개선안을 제안하였고, 각각을 유한요소법을 사용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 단조공정

기존의 단조공정중 피니셔공정에서 소재의 미충진결합이 보였으며, 성형이 완료될 때까지 플래시가 많이 형성되었기 때문에, 그 결과 과다하중의 원인이 되었다.

(2) 공정 개선안 I

초기 소재의 부피를 기존 단조공정에 비해 약 7% 감소시켰다. 그 결과 피니셔공정시에 금형의 외부로 유동하는 소재의 부피가 줄어들었으며 플래시도 덜 발달하였으므로 단조하중이 약 14% 줄었다. 이 개선안은 단조하중이 프레스 용량에 비해 작으므로 과다하중에 의한 문제점을 해결할 수 있었다. 하지만 본 공정 개선안 I에는 피니셔공정에서 소재의 미충진결합은 해결하지 못한 단점이 있다.

(3) 공정 개선안 II

전방압출공정 및 옆셋팅공정의 금형을 수정하여 단조하중을 감소시켰으며, 피니셔공정의 금형은 완전히 수정하여 후방압출이 되게 하였다. 그 결과로서 기존공정의 단조하중에 비해 전방압출공정의 단조하중이 약 18%, 옆셋팅공정의 단조하중이 약 9% 그리고 피니셔공정의 단조하중이 약 17%의 감소를 보이고 있으므로 최대용량이 630ton 인 프레스에서도 작업이 가능함을 알 수 있다. 그리고 초기 소재의 부피를 기존 단조공정에 비해 17% 감소시킬 수 있었고, 소재의 미충진결합도 해결할 수 있었다.

후기

본 연구는 2000년도 두뇌한국 21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 단조 금형의 제작 지원과 실험에 협력해 주신 ㈜우진공업 등의 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. Oh, S. I., "Finite Element Analysis of Metal Forming Process with Arbitrarily Shaped Dies," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 24, pp. 479~493, 1982.
2. Yu, G. B. and Dean, T. A., "A Practical Computer Aided Design Approach to Design for Axisymmetric Forging Die Cavities," *Int. J. Mach. Tool, Des. Res.* Vol. 25-1, pp. 1~13, 1985.
3. Hwang, S. M. and Kobayashi, S., "Preform Design in Disk Forging," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.26, No. 3, pp. 189~201, 1986.
4. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., "Metal Forming and the Finite-Element Method," Oxford University Press, 1989.
5. Kim, N. S. and Kobayashi, S., "Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the finite Element Method," *Int. J. Mach. Tools and Manufacture*, Vol. 30, pp. 243~268, 1990.
6. Kang, B. S. and Kobayashi, S., "Preform Design in Ring Rolling Process by the Three-Dimensional Finite Element Method," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 31, No. 1, pp. 139~151, 1991.
7. Scientific Forming Technologies Corporation, DEFORM-2D.