

## Piston-Pin 제작공정의 비교해석

김 장 군, 장 동 환, 황 병 복\*  
인하대학교 공과대학 자동화공학과 대학원  
\*인하대학교 공과대학 자동화공학과

## A Comparisomal Analysis Among the Processes of Piston-Pin Production

Jang-Koon Kim, Dong-Hwan Jang and Beong-Bok Hwang\*  
Gradute student, Department of Industrial Automation, Inha University  
\*Department of Industrial Automation, Inha University

### Abstract

Several cold extrusion processes to produce an axisymmetric steel piston-pin are investigated for comparing each other. Two methods among four conventional ones are selected to be simulated using the rigid-plastic finite element method. One of the both methods using a mechanical press has one stage process and the other utilizing a cold header applies a multi-stage process to produce a final product. Because the main process is a backward extrusion, the design criteria such as the backward extrusion ratio and punch diameter to depth ratio are considered. 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 be a good design criteria in the future work to advance the manufacturing process.

**Key word** : Cold Extrusion, Piston-Pin, Rigid-Plastic Finite Element Method, Process Sequence, Backward Extrusion, Design Criteria

### 1. 서론

냉간압출은 직접, 간접압출과 단조 등의 공정이 조합된 것을 일컫는 일반적 용어이며, 상온 또는 재료가 재결정 일으키지 않는, 예를들어 철의 경우 700 - 800°C ( 1292 - 1479 °F)<sup>1)</sup>이하의 온도에서 여러 가지 재료의 빌렛을 사용하여 다양한 형상을 압출하는 작업으로, 가공공구의 재료나 프레스기계의 발달과 더불어 가공법의 급속한 전파가 이

루어 졌다. 또한 냉간압출은 변형 및 마찰로 인한 발생열로 압출된 금속에 재결정을 일으키지 않는한, 가공경화로 인해 기계적 성질이 개선되고, 가공오차의 조절이 양호하므로 후속되는 절삭 또는 마무리 작업의 필요를 줄인다. 또한 윤활이 효과적이면 표면경도가 개선되고 산화막이 생기지 않으며, 생산속도가 높고 비교적 가공비가 싸다는 장점이 있다.

하지만, 냉간압출이 최종생산품을 생산하기위한 적절한 방법인가를 판단하는 것은 쉬운 작업이 아니며, 이는 전문가가 최종생산품의 사용목적, 소재의 재료, 물성, 열처리나 냉간압출 후 가공의 필요성 등의 모든요소를 종합적으로 고려해 판단해야 한다. 또한 앞서 예시한 모든 조건을 종합해 전문가가 냉간압출의 방법을 택하더라도, 사용재료나 다이모양 등과 같은 점을 고려 적절한 사용기계의 선택이 중요하며, 선택된 기계의 특성에 맞는 최선의 공정선택은 반드시 필요하다.<sup>2)3)</sup>

이러한 최선의 공정선택을 위해서 공정설계에 관한 많은 연구들이 행해졌으며<sup>4)5)6)</sup>, 소성가공의 이론적 해석은 1973년 Kobayashi 와 Lee<sup>7)</sup>에 의해 제안된 이후, 공정에 영향을 미치는 마찰, 소재가압력 등 여러가지 인자들의 영향을 고려할 수 있고 비교적 신뢰할 수 있는 해를 구할 수 있는 유한요소법에 의한 해석이 일반화 되었다. 또한 유한요소법을 이용한 소재 형상 설계에 관한 연구<sup>8)9)10)</sup>도 많이 발표되고 있다. 이러한 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 통해 실제 공정설계에 필요한 정보를 미리 얻음으로써 현재 현장에서 숙련자의 경험과 실험에 의한 시행착오를 통한 개발 및 생산에 소요되는 시간적, 경제적 절감효과 및 공정수의 감소 등의 효율적인 공정설계를 하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

그렇지만 이와같은 연구들은 주로 최적공정선택을 위한 평가가 주로 공정수를 줄임으로서 부가적인 금형의 제작비와 성형기계 대수 등의 감소에 중점을 두고 있으며, 공정의 창출과 함께 고려되어야 할 기계적 성능의 향상이나 창출된 공정에 의한 기계적 결합발생에 대한 가능성의 연구에 대해서는 미흡하다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 각기 다른 생산방법을 가진 피스톤핀(piston-pin)의 기존의 제작공정들을 해석하여 각 공정의 특성을 분석하고자 한다.

## 2. 기존제작공정 및 해석방법

본 논문의 해석대상인 피스톤핀은 피스톤 측면의 중앙에서 약간 아랫쪽을 좌우로 관통하는 핀 구멍에 끼워지는 진원통형의 핀형 축으로 피스톤의 직선운동을 커넥팅 로드의 상단에 전달하며, 커넥팅 로드는 이것을 크랭크축에 회전력으로 전달한다. 또한 피스톤핀은 피스톤과 더불어 실린더 속에서 고속으로 왕복 운동하기 때문에 중량을 가볍게 하기 위해 핀의 속을 중공으로 하고 피스톤의 양쪽 구멍에서 핀 구멍으로 받는 커다란 굽힘력과 핀 구멍에 대한 베어링 마찰에 의한 마모에 견디기 위해 Ni, Cr강을 재료로 하며, 침탄 또는 질화에 의해 표면 경화(Surface hardening)를 한다.<sup>11)</sup> 피스톤핀을 생산하기 위한 방법에는 여러가지가 있으며, 대표적인 방법으로 다음의 4가지로 요약될 수

있다.(표 1 참조)

강소성유한요소법<sup>12)13)</sup>은 적용이 쉽고 계산시간이 단축되므로 소성변형에 비하여 상대적으로 매우 적은 탄성변형을 무시하고 있으며, 특수성형 공정을 제외한 대부분의 소성가공공정에서 가속도의 영향은 미미하므로 해석시 이를 무시하고 있다. 또한

process comparison	method 1	method 2	method 3	method 4
machine	mechanical press	mechanical press	cold header	mechanical press
total step	1	1	7	5
main operation	backward extrusion, forward extrusion	backward extrusion, forward extrusion	backward extrusion	extrusion, drawing
production rate	700 pieces / hr	2500 pieces / hr	3500 pieces / hr	2000 pieces / hr
centerweb removing method	by drilling	by drilling	in sequence	piercing

Table 1. Comparison of each production method

소재는 등방성경화의 성질을 지니고 있다고 가정하고 있으며, 일반적으로 이러한 가정들이 해의 정확도에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고 있다.<sup>14)</sup> 본 논문의 해석대상인 피스톤핀의 경우도 탄성변형량이 소성변형에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작고 압출(extrusion)이 주된 작업공정이기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성 유한요소법을 사용한다. 피스톤핀의 제작에 쓰이는 재료는 AISI 5120 강재를 사용하여 제작되며, 비누윤활을 한다. 그러므로 마찰계수는 전 공정에서 0.1<sup>1)</sup>을 사용하였으며, 또한 피스톤핀의 제작은 냉간가공작업으로 작업이 재결정온도 이하에서 이루어 지므로 시뮬레이션에 사용된 물성식은 다음의 식으로 사용하였다.<sup>15)</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 단공정 제작방법의 해석결과

단공정의 제작방법은 앞서 표 1에서 제시한 제작공정중 방법1 과 2에 해당하는 공정으로 두 방법 모두 기계적프레스를 사용하여 생산하며, 방법2의 공정은 소재의 자동공급에 의해 방법1보다 시간당 생산량이 월등히 높다. 두 방법 모두 중공축에 있는 웹(web)은 드릴링 작업에 의해 제거된다.

아래의 그림1은 단공정으로 행해지는 생산방법의 냉간압출공정에 대한 시뮬레이션의 초기상태와 격자구성 그리고 시뮬레이션이 완료된 후 재료에 나타난 유효변형율의 분포, 그리고 시뮬레이션에 의한 행정/하중선도를 나타내고 있다.

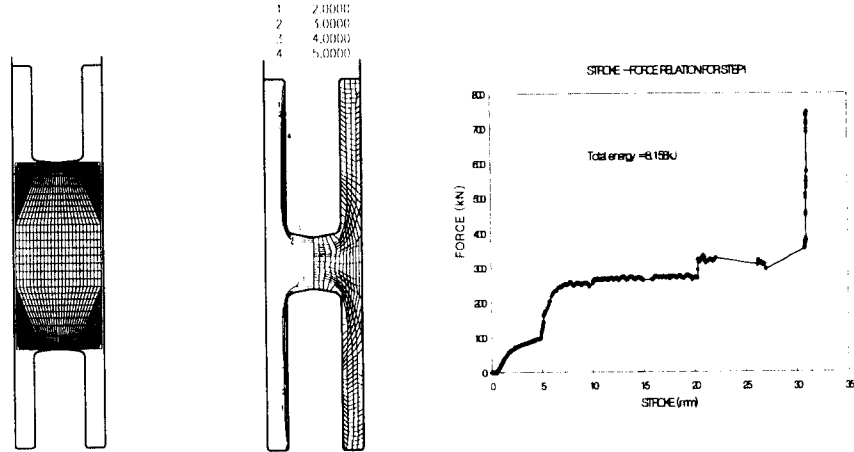


Fig 1. Deformation patterns and load-stroke relationship for one step process

소재는 양쪽에서 같은 속도로 동시에 움직이는 펀치사이에 위치해 있으며, 소재와 다이사이에는 공차에 의한 약간의 간격이 존재한다. 실제의 펀치에서 랜드(land)라고 불리는, 즉 펀치의 끝부분과 기둥부분이 만나는 지점에 약간 돌출된 부분은 시뮬레이션상에서 펀치에 약간의 라운드를 주어 근사화 시켰다. 중간에 이어지는 그림은 시뮬레이션이 완료된 후의 변형율분포를 보여주고 있다. 유효변형율은 약 5.00까지의 분포를 보이고 있으며, 상하대칭의 펀치의 모양에 따라 유효변형율의 분포도 상하대칭의 모양을 보인다. 유효변형율의 분포는 펀치의 벽면을 따라 큰 값을 나타내고 있어 가공경화에 의한 경화가 피스톤핀의 안쪽면에 집중됨을 알 수 있다. 공정에서의 펀치직경은 13.21mm 이고 펀치의 길이는 31.75mm로 펀치길이대 직경비가 2.403으로 전문가에 의해 제시된 펀치대직경비 3을 넘지 않으며, 면적감소율도 64.7%로 탄소강에 대해 제시된 최대 70~75 %, 최소 20~25%이내의 값을 가진다.<sup>16)</sup> 오른쪽의 행정/하중선도를 보면, 전 행정중 초반 5 mm까지는 하중의 크기가 일정한 기울기를 가지고 증가하는 인덴테이션작업의 경향을 나타내며, 후방압출이 시작되는 부분에서 하중이 급격히 증가한 후 일정한 값을 나타낸다. 행정이 끝나는 부분에서 압출하중이 급격히 증가하며, 경계점들이 다이에 모두 닿을 때를 공정이 끝난 것으로 판단해 최대하중값을 취하면 745.8kN의 결과를 보였다. 이 공정에 소요된 총에너지는 16.315kJ이다.

### 3.2. 다공정 제작방법의 해석결과

다공정제작방법은 기존의 제작방법중 3번째 방법으로 콜드헤더(cold header)를 사용하여 생산하는 방법으로, 시간당 생산량이 3500개로 나머지 3방법에 비해 가장 많으며 중공축 중앙의 센터웍도 공정중에 제거되므로 피스톤핀의 대량생산에 가장 적합한 방법이다.

아래의 그림2 와 3은 초기 공정인 인덴테이션 공정의 시뮬레이션의 결과를 보여주고 있다.

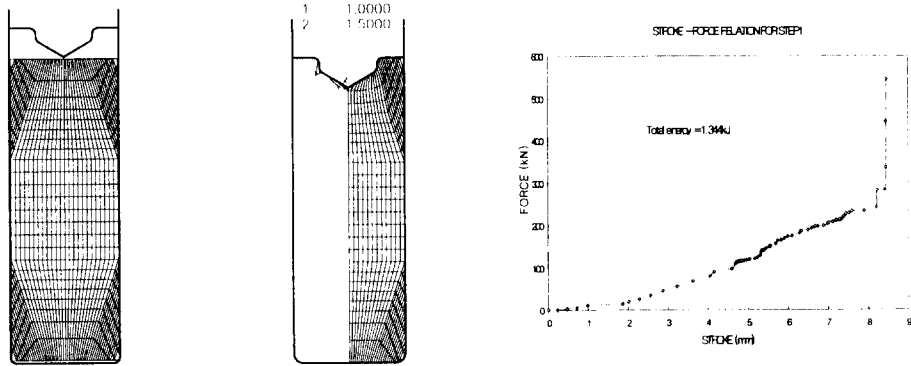


Fig. 2. Deformation patterns and load-stroke relationships for step1 of multi-stage production method

인덴테이션 공정에서 펀치의 모양은 소재에 자리내기를 위하여 끝부분이 각지게 되어 있으며, 시뮬레이션이 완료된 후 유효변형율의 분포도 펀치의 각진 부분에서 크게 나타나고 있다. 실제공정의 두 인덴테이션 공정사이에서 소재의 이동은 스프링 클램프 (spring clamp)에 의해 이송된다. 행정/하중선도를 보면, 두 공정 모두 하중이 일정한

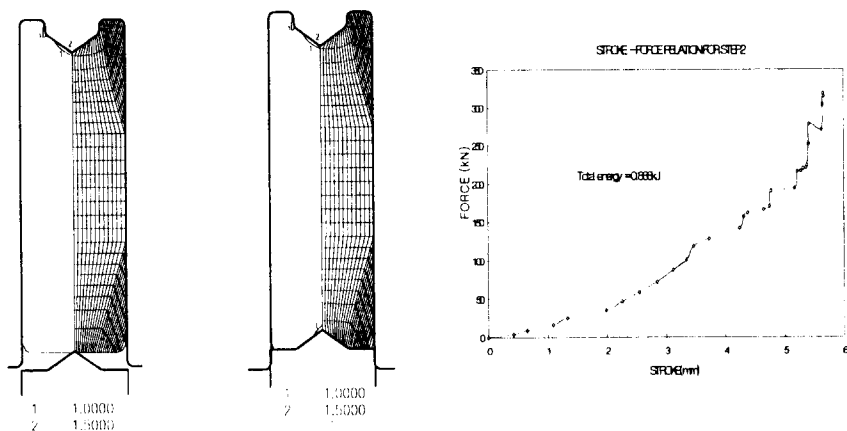


Fig. 3. Deformation patterns and load-stroke relationships for step2 of multi-stage production method

기울기를 가지고 증가하는 경향을 보이며, 최대 펀치하중은 첫 번째 공정에서 544.5kN,

두 번째 공정에서 315.0kN의 결과를 보인다. 공정중 소모된 총에너지는 각각 1.344kJ과 0.888kJ이다.

다음의 그림4 와 5는 세 번째와 네 번째 공정인 후방압출에 대한 시뮬레이션결과를 보여주고 있다.

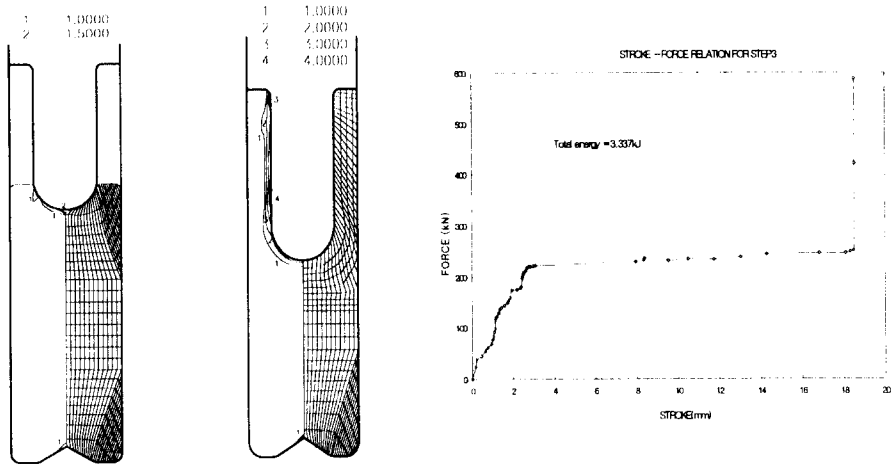


Fig. 4. Deformation patterns and load-stroke relationships for step3 of multi-stage production method

세 번째 공정에서는 상단의 펀치가 내려오면서 앞서 인텐테이션 작업에 의해 센터의 위치가 잡혀있는 재료의 한쪽 부분을 후방압출시켜서 최종생산품인 피스톤핀의 반쪽 중 공축을 만드는 작업이다. 변형이 완료된 후의 유효변형율의 분포는 펀치의 벽면을 따라

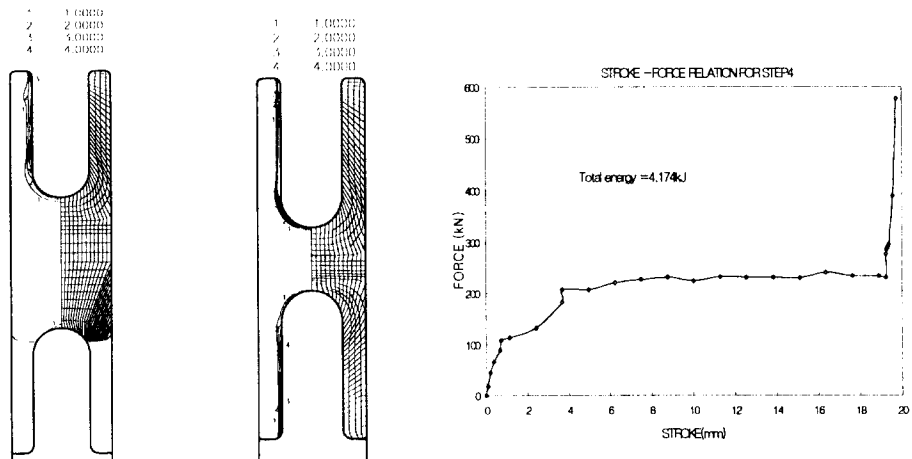


Fig. 5. Deformation patterns and load-stroke relationships for step1 of multi-stage production method

크게 분포하므로 앞서 시뮬레이션을 수행한 단공정과 같이 가공경화가 피스톤핀의 안쪽 벽에 집중됨을 알 수 있다. 이 공정에서의 펀치직경 대 길이비도 역시 2.403이고, 면적 감소율이 64.7%이므로 전문가에 의해 후방압출에 대해 제시된 값을 넘지 않는다.

그림 5의 공정은 앞선 공정의 대칭인 후방압출작업으로 앞선 공정에서 가공하지 않은 나머지 반쪽을 후방압출시켜 피스톤핀의 중공형상을 완성하는 작업으로 유효변형율의 분포도 앞선 공정과 대칭임을 볼 수 있다. 행정/하중의 선도를 보면 행정초반에 하중의 크기가 급격히 증가한 후 일정한 크기로 진행하다가 행정후반 급격히 증가됨을 볼 수 있다. 행정의 끝에서 최대하중은 세 번째 공정에서 588.8kN이며, 네 번째 압출공정에서 577.2kN이며, 소요에너지는 각각 3.337kJ과 4.174kJ이다.

#### 4. 기존공정의 정리 및 비교

기존의 공정중에서 기계적 프레스를 이용하여 단공정으로 최종제품을 생산하는 공정과, 콜드헤더를 이용하여 다단계의 생산공정을 가지는 생산방법에 대한 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

1. 두 생산방법 모두 전문가에 의해 후방압출에 대해 제시된 면적감소율과 펀치직경대 길이비의 가공규칙 한계내에 있다.
2. 유효변형율의 크기나 분포는 두 공정 모두 펀치의 벽면을 따라 커다란 분포를 보인다. 그러므로 냉간압출작업에 의한 가공경화는 피스톤핀의 안쪽면에 집중됨을 알 수 있다.
3. 최대하중면에서 볼 때 단공정의 제작공정은 다공정에 비해 최대하중이 상대적으로 크다. 그러므로 시간당 생산속도는 많지만 하중의 범위가 상대적으로 낮은 콜드헤더에는 적합치 않는 공정으로 판단되므로 각 공정에 대한 사용기계의 선택은 적절한 것으로 판단된다.
4. 콜드헤더의 각 공정간 하중분포에서 인텐테이션과 후방압출공정간에 하중차이가 크다. 이것은 콜드헤더에 의한 가공이 여러공정을 헤더의 일회행정에 의해 행해진다는 가공특성상 좋은 공정배열이라고 할 수가 없으므로 이에 대한 공정의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

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

#### 참고문헌

1. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press, 1989.
2. American Society For Metals, 1975, "Source Book on Cold Forming," Library of

- Congress Cataloging in Publication Data, p. 246.
3. 김낙수, 임용택, 진종태 공역, "공업재료가공학," 2nd Edition, pp. 320-321.
  4. S. K. Biswas and W. A. Knight, "Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies," Proc. 15th Int. MTDR Conf., p. 135, 1974.
  5. N. Akgerman and T. Altan, "Recent Developments in Computer-Aided Design of Firing Process," SME Technical Paper, No. 72-110, April, 1972.
  6. G. B. Yu and T. A. Dean, "A practical computer-aided approach to mould design for axisymmetric forging die cavities," Int. J. March. Tool Des. Res., Vol. 25, p. 1, 1985.
  7. C. H. Lee and S. Kobayashi, Trans, ASME, J. of Engrg. for Ind., 95, 1973, 865.
  8. N. Kim, S. Kobayashi, 1986, Blank design in rectangular cup drawing by and approximate method, J. Mach. Tool Des. Res., 26-2, 125.
  9. K. Chung, O. Richmond, 1992, Sheet forming process design based on ideal forming theory, NUMIFORM'92, pp. 455-460.
  10. H. Y. Jiang, D. Lee, 1992 Numerical simulation of sheet metal forming process based on large deformation shell elements, NUMIFORM'92, pp. 485-489.
  11. 김응서, 가솔린 엔진구조, 집현사, 1983. pp. 64-65.
  12. 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.
  13. 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.
  14. 황상무, 전만수, 류성룡, 문호근, 한국소성학회 '94추계학술대회 논문집, "POSFORM-단조공정 해석 및 설계용 CAE시스템", pp. 95-104.
  15. Air Force Materials Laboratory, 1973, "Forging Equipment, Materials, and Practices," Metals and Ceramics Information Center, p.164.
  16. K. Sevenler, P. S. Raghupath, and T. Altan, "Forming-sequence design for multistage cold forging", 1987, pp. 121-135.