

폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 링크의 정역학적 해석과 구조해석

엄재근*, 전병윤*, 전만수#

Static and Structural Analyses of the Link of a Double-Action Link-Type Hydraulic Die Set

Jae Gun Eom*, Byoung Yoon Jun* and Man Soo Joun#

ABSTRACT

This paper presents the mechanics of the link of a double-action link-type hydraulic die set for the enclosed die forging. Operational principle of the die set in the enclosed die forging is introduced with emphasis on force transmission from the press and the hydraulic system to the material through links, die components and punches. The force exerted on the link is statically investigated and its structural analysis is carried out. The analyzed results are discussed to be used for design of the link system.

Key Words : Enclosed Die Forging(폐쇄단조), Double-Action Link Hydraulic Die Set(복동링크유압식 다이세트), Net Shape Forming(정형성형), Link Force(링크 하중), Structural Analysis(구조해석)

1. 서론

기계부품소재회사는 수요처로부터 품질과 원가 양면에서 심한 압박을 받고 있으며, 이에 능동적으로 대응하기 위한 다각도의 노력을 경주하고 있다. 이러한 시대적 요구로 인하여 소재의 낭비를 줄이고 고품질을 유지하는 생산방법으로 소성가공, 특히 정밀정형성형 기술^{1,7}이 주목을 받아왔다.

주로 냉간 및 온간성형에 적용되는 폐쇄단조(Enclosed die forging)는 정밀정형단조의 대표적인 예이다. 폐쇄단조의 요소기술은 폐쇄단조 및 관련

다이세트 기술에 있다. 현재 국제적으로 널리 사용되고 있는 폐쇄단조용 다이세트는 니찌다이형²(NICHIDAI Type)과 코마츠형(KOMATSU Type)이 있다. 니찌다이형은 링크를 사용하는 방식으로 시스템이 단순하며 강도 확보가 용이하고 다이세트의 평형도 조절이 양호하여 가공 정도가 좋은 장점이 있으므로 가장 널리 사용되고 있다. 반면 코마츠형은 락과 피니언을 사용하는 방식으로 제품의 정도가 기어의 정도에 영향을 많이 받으며, 상급형과 하급형의 속도비가 2:1로 일정하다. 니찌다이형은 상하의 링크 길이를 변경시킴으로써 상부와 하부의 속도를 다양하게 변화시킬 수 있는

접수일: 2006년 4월 7일; 게재승인일: 2006년 9월 5일

* 경상대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부·항공기부품기술연구소

E-mail msjoun@gnu.ac.kr Tel. (055) 751-5316

장점도 있다. 우리나라의 단조업계에서는 대부분 니퍼다이 형의 폐쇄단조용 다이세트를 사용하고 있으나, 이 분야에서 우리나라는 단순 모방 수준에 머무르고 있다.

폐쇄단조용 다이세트는 일반 다이세트에 비하여 매우 복잡한 기구학적 및 역학적 특성을 지니고 있으므로 기구학적 및 역학적 해석이 개발과 운용에 앞서 필수적이다. 지금까지 폐쇄단조용 다이세트를 이용한 기어류의 응용연구는 링크 시스템을 제외한 연구와 단동식 폐쇄다이세트에 관한 연구가 대부분이다. 비록 정밀정형단조 및 폐쇄단조에 관한 응용연구가 다수의 연구자들¹⁻⁷에 의하여 이루어졌지만, 링크 시스템의 연구와 연관된 문헌이 발표된 바가 없으므로 체계적인 연구가 폐쇄단조용 다이세트의 개발과 활용의 양면에서 절실하다고 사료된다. 최근 Jun 등⁸은 복동링크유압식 다이세트를 사용한 폐쇄단조의 폐쇄단조조건을 제시함으로써 폐쇄단조 및 관련 다이세트의 연구를 위한 토대를 구축하였다.

폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트에서 링크는 가장 취약한 부분이다. 예상치 못한 링크의 파손으로 부수적인 피해가 발생할 수도 있다. 본 논문에서는 폐쇄단조용 복동링크유압식 폐쇄다이세트의 링크에 작용하는 하중의 정역학적 해석을 실시하고 링크의 구조해석을 실시하고자 한다. 이를 통하여 링크 시스템 및 부품의 역학적 현상을 규명하고 링크 시스템의 설계를 위한 학술적 정보를 제공하고자 한다.

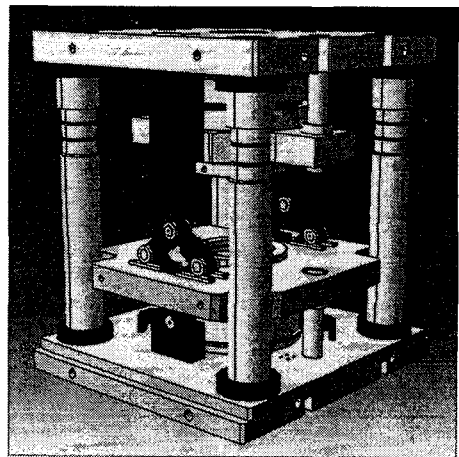
2. 폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 작동 원리

Fig. 1 은 복동링크유압식 폐쇄단조용 다이세트의 개념도와 각 구성품의 명칭을 나타낸 것이다. 이 다이세트는 크게 상부, 중부, 하부 등으로 나눌 수 있다. 상부는 슬라이더(Slider), 상판(Upper plate), 상유압실린더(Upper hydraulic cylinder), 상금형 또는 상형(Upper die), 상편치(Upper punch) 등으로 구성되고, 중부는 중간판(Middle plate)과 링크(Link)로 구성되며, 하부는 볼스터(Bolster), 하판(Lower plate), 하유압실린더(Lower hydraulic cylinder), 하금형 또는 하형(Lower die), 하편치(Lower punch) 등으로 구성되어 있다.

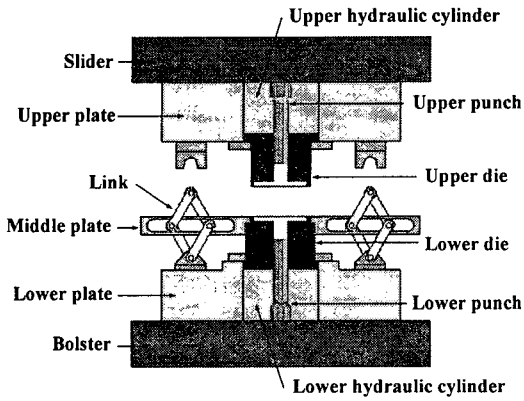
먼저 다이세트의 작동원리는 다음과 같다. 슬

라이더가 하강하면서 상판과 링크가 접촉하게 된다. 이 과정에서 소재에 소성변형이 발생한다면, 그것은 일반 단조의 변형과 동일하다. 이때부터 상부와 링크 시스템에 의하여 부가된 속도로 상형과 하형이 단힐 때까지 하강한다. 상형과 하형이 단혀지면, 상형과 하형의 속도는 중간판의 속도와 동일하게 되며, 상형과 상편치 사이와 하형과 하편치 사이의 상대운동이 발생하게 된다. 그 결과, 상부와 하부의 편치가 상대운동에 의하여 소재에 성형하중을 가하게 된다. 이 때, 상형과 하형에 작용하는 분리력(Enclosed die separating force), 즉 상금형 하중과 하금형 하중은 유압 시스템에 의하여 지탱된다.

링크 시스템은 상부의 운동과 연계된 중간판의 운동⁹을 통제하고 이 운동에 필요한 힘을 전달하는 역할을 한다. 상부와 하부의 유압실린더는 폐쇄 이전에는 금형과 다이세트간의 상대운동을 방지하는데 필요한 하중 또는 성형하중을 지탱하며 상부와 하부의 금형이 폐쇄된 이후 이를 유지하는데 필요한 폐쇄하중을 지탱한다. 상부와 하부의 편치는 금형이 폐쇄된 후 소재를 밀폐된 금형 공간에 채움으로써 소재를 원하는 형상으로 성형하는 역할을 담당한다.

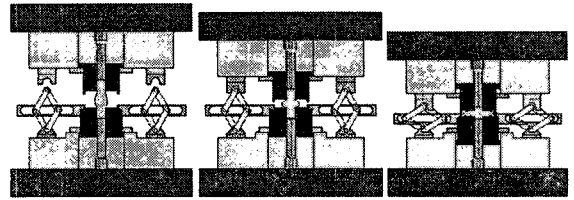


(a) A three-dimensional model



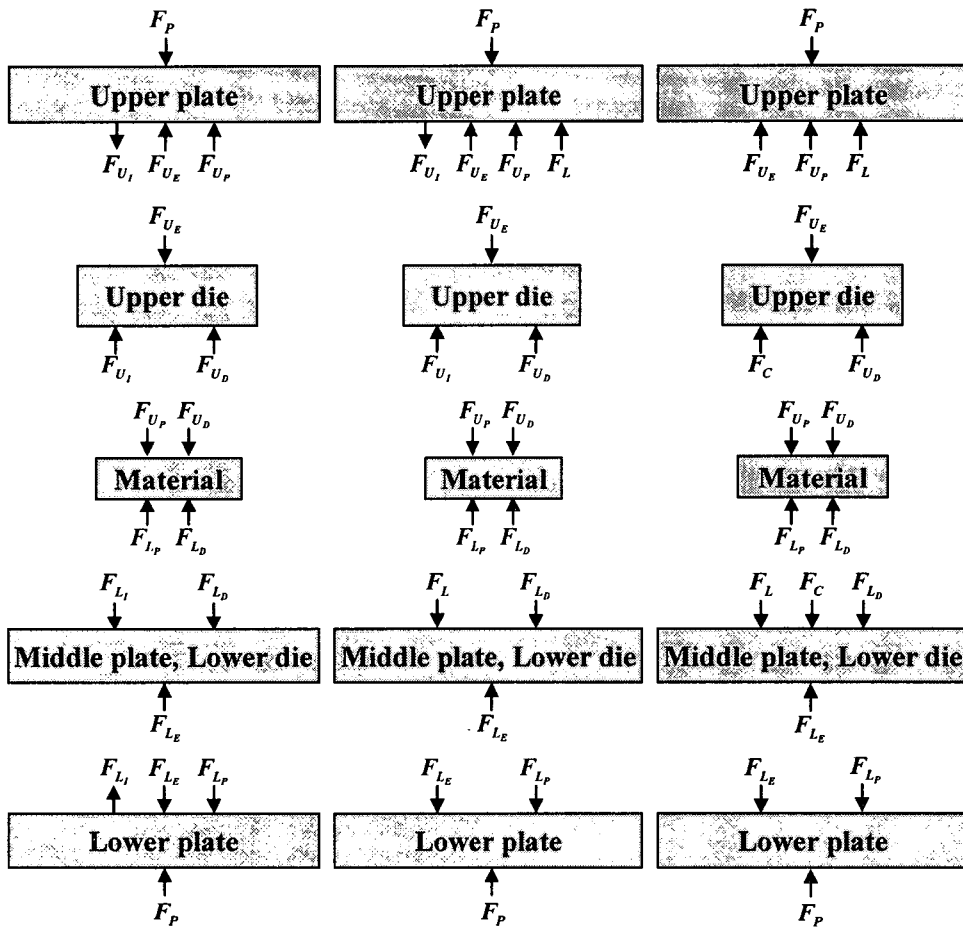
(b) Conceptual drawing

Fig. 1 Conceptual drawing of the enclosed die forging die set



(a) Mode 1 (b) Mode 2 (c) Mode 3

Fig. 2 Three different modes in the enclosed die forging



(a) Mode 1

(b) Mode 2

(c) Mode 3

Fig. 3 Free body diagram of the double-action link type hydraulic die set for the enclosed die forging

3. 폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 링크에 작용하는 하중

폐쇄단조는 일반단조와 달리 성형하중을 소재에 전달하는 메카니즘이 복잡하며, Fig. 2 에서 보는 바와 같이, 복동링크유압식 다이세트의 경우 크게 3 가지의 하중 작용 모드로 구분할 수 있다. 첫 번째 모드(Mode 1 이라고 함)는 상판이 링크 시스템에 접촉하지 않은 상태이며, 두 번째 모드(Mode 2 라고 함)는 링크 시스템에 하중이 부과되었으나 폐쇄가 되지 않은 상태이고, 세 번째 모드(Mode 3 이라고 함)는 링크 시스템에 하중이 부과되면서 동시에 폐쇄가 일어난 상태이다.

각 모드에 대한 자유물체도는 Fig. 2 에서 보는 바와 같다. Mode 1 에서는 하판과 하금형이 접촉상태에 있기 때문에 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 접촉하중 F_{L_1} 가 작용하며, Mode 1 과 Mode 2 에서는 상판과 상금형이 일체로 움직이기 때문에 Fig. 3(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 접촉하중 F_{U_1} 가 작용한다. 그리고 Mode 2 와 Mode 3 에서는 링크를 통하여 상판에서 중간판으로 하중이 전달되므로 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 링크 하중 F_L 이 작용하고, 폐쇄가 발생하면 상금형과 하금형간에 접촉하중 F_C 가 작용한다.

Fig. 3 의 자유물체도에 평형조건식을 적용하여 정리하면, 링크 하중 F_L 을 다음 식으로 표현할 수 있다⁸.

(i) Mode 1

$$F_L = 0 \quad (1)$$

(ii) Mode 2

$$F_L = F_{L_E} - F_{L_D} \quad (2)$$

(iii) Mode 3

$$F_L = F_{L_E} - F_{U_E} + F_{U_D} - F_{L_D} \quad (3)$$

여기서 F_{U_D} , F_{U_E} , F_{L_D} , F_{L_E} 는 각각 상금형 하중, 상부 폐쇄하중, 하금형 하중, 하부 폐쇄하중을 의미한다.

편의상 링크 시스템에 작용하는 하중을 두 가지의 예제를 통하여 설명한다. 첫 번째 예제로 상하대칭이면서 Mode 1 과 Mode 2 가 존재하지 않는, 즉 처음부터 금형의 폐쇄가 발생한 공정에 관하여 링크 하중을 분석해 보자. 이 경우, 상금형 하중 F_{U_D} 와 하금형 하중 F_{L_D} 가 동일하므로 만약 상부

폐쇄하중 F_{U_E} 와 하부 폐쇄하중 F_{L_E} 를 동일하게 하였다면 식 (3)으로부터 링크의 하중은 작용하지 않음을 알 수 있다. 그러나 실제 하부 폐쇄하중을 폐쇄단조조건⁸의 충족과 불확실성의 고려 차원에서 다소 낮게 하고 있다. 따라서 이 경우에는 상하폐쇄하중의 차이만큼의 하중이 링크에 부과된다.

두 번째 예제로 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 축대칭인 가상의 공정을 선택하였다. Fig. 4 의 해석 결과는 강소성 유한요소법에 근거한 단조시뮬레이션 기술¹⁰에 의하여 예측된 것이다. 해석에 사용된 소재의 변형저항식은 $\bar{\sigma} = 750.0E^{0.2}$ MPa 이며, 마찰계수는 0.05 이다. 그리고 각 금형의 속도를 Fig. 5 에 나타내었다. 이 공정은 Mode 2 로부터 출발하여 Mode 3 에서 성형이 완료된다.

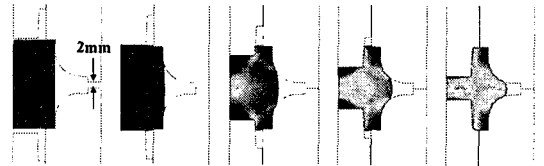


Fig. 4 Finite element results of a model process

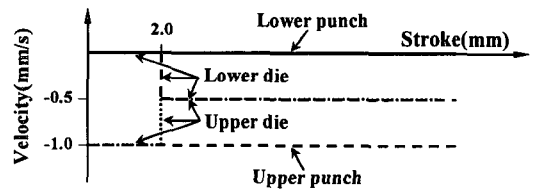


Fig. 5 Velocity profiles

Fig. 6 에 다이세트의 구성품에 작용하는 하중을 해석결과를 이용하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 최대의 하금형 하중은 1083kN 으로 예측되었다. 일반적으로 하부 폐쇄하중은 안전계수를 고려하여 최대 하금형 하중의 120%를 잡고 있다. 그리고 폐쇄단조조건⁸의 충족을 위하여 일반적으로 하부의 폐쇄하중이 상부의 폐쇄하중에 비하여 약간 크도록 설계하고 있다. 본 연구에서는 하부 폐쇄하중이 상부 폐쇄하중에 비하여 하금형 하중의 10%만큼 크게 설정되었다고 가정하였고, 단조 중 폐쇄하중은 일반적으로 일정하게 유지시키므로 폐쇄하중의 변화는 없다고 가정하였다.

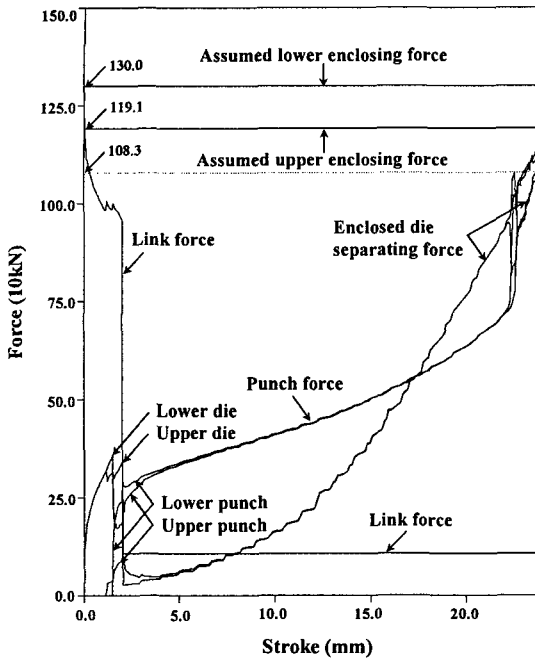


Fig. 6 Variation of the link force with stroke

전술한 조건 하에서 링크에 작용하는 하중은 Fig. 6 에서 보는 바와 같다. 폐쇄가 발생하지 않은 상태에서 링크가 상판에 접촉하는 순간, 하부 폐쇄하중의 대부분이 링크에 전달된다. 성형이 진행되면서 하급형 하중은 일반적으로 증가하며, 그만큼 링크 하중은 감소하게 된다. 폐쇄가 발생하면, 링크에 작용하는 하중은 급격히 줄어드는 양상을 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 상부와 하부의 폐쇄하중이 동일하고 상급형 하중과 하급형 하중이 동일하면, 링크에 작용하는 힘은 없게 된다. 그러나 실제로는 상하대칭의 공정에서도 공정 및 재료로부터 발생하는 불확실성으로 인하여 폐쇄단조 조건을 유지하기가 불가능하므로 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 상부와 하부의 폐쇄하중의 차이만큼의 하중이 폐쇄 이후에도 링크에 작용하게 된다.

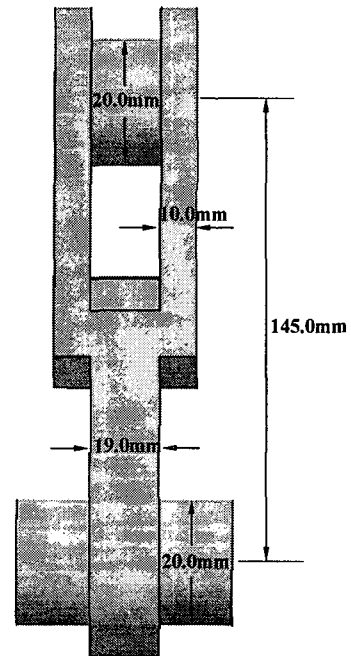
4. 링크의 응력해석

폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트에서 구조역학적으로 가장 취약한 부분은 링크 시스템이다. 상판, 중간판, 하판 등 다른 부품들은 일반적으로 매우 두꺼운 소재를 사용하므로 구조역학적

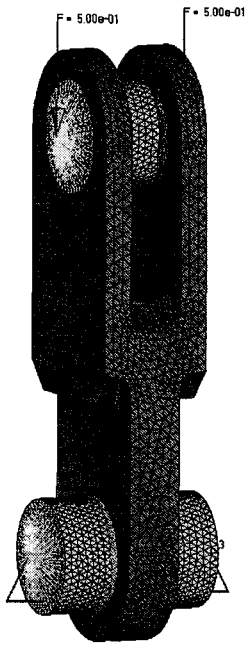
으로 매우 안전하다. 따라서 본 연구에서는 링크 시스템의 구조해석만 실시하였다.

링크 시스템의 구조해석을 위하여 링크 시스템을 접촉문제로 모델링하였다. 사용된 S/W 는 ABAQUS 이다. Fig. 7 은 링크 시스템의 설계와 구조해석 모델을 나타내었다. 탄성계수와 포아송비를 각각 210GPa 과 0.3 으로 하였고, 상부 판 A 에 단위하중을 가하였으며, 하부 판 B 에는 구속조건을 설정하였다. 유한요소해석모델은 13722 개의 절점과 56356 개의 사면체요소로 구성되어 있다. 접촉면에서 마찰계수는 0.05 로 간주하였다.

링크에 작용하는 유효응력의 분포를 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이 단위하중이 가해졌을 때, 최대유효응력은 3730Pa 이며 연결부위의 접촉면에서 발생하였다. 이 응력이 작용할 경우 재료(SKD11)의 항복응력이 2500MPa 내외이므로 하나의 링크가 전달할 수 있는 최대 전달하중은 670kN 이다.



(a) Design of a link



(b) Finite element model

Fig. 7 Design of a link and its finite element model

S, Mises (Ave. Crit.: 75%)	
█	+3.732e-03
█	+3.421e-03
█	+3.110e-03
█	+2.799e-03
█	+2.489e-03
█	+2.178e-03
█	+1.867e-03
█	+1.556e-03
█	+1.245e-03
█	+9.346e-04
█	+6.237e-04
█	+3.129e-04
█	+2.101e-06

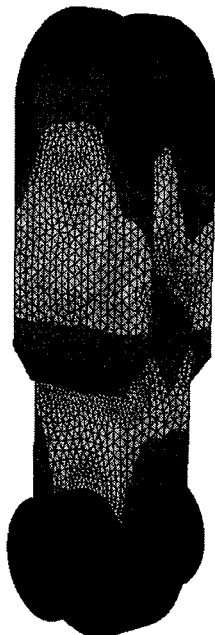


Fig. 8 Effective stress distribution of the link

일반적으로 산업현장에서는 상부 또는 상판이 링크에 닿을 때 링크가 약 60° 기울어져 있게 설계하고 있으며, 폐쇄가 발생할 때 링크의 각도가 50° 이하가 되지 않도록 운용하고 있다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이 폐쇄가 발생하면, 링크 하중이 급격하게 떨어지므로 링크에는 큰 무리를 주지 않는다. 따라서 최악 조건으로 링크가 50° 기울어져 있다고 하면, 해석에 사용된 모델로 전달할 수 있는 수직방향으로의 성형하중은 최대 510kN 이며, 네 개의 링크가 사용될 경우 약 2000kN 의 링크 하중을 전달할 수 있다.

따라서 Fig. 7(a)의 링크를 이용하여 Fig. 4 의 모델 공정을 실제 생산한다면, 재료의 피로파괴 등을 고려하여 정기적인 유지 보수가 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 정역학적 해석 결과를 바탕으로 폐쇄단조에서 발생하는 링크하중을 결정하였다. 유압프레스를 사용할 경우에는 동적하중이 상대적으로 작지만, 기계식 프레스를 이용한 고속 성형 시에는 다소의 동적하중이 발생할 것으로 판단되므로 이에 관한 고려가 필요하다고 사료된다.

5. 결론

본 논문은 폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 개발과 운용에 핵심적인 요소인 링크 시스템의 역학적 거동 특성을 학술적으로 밝혔다. 이를 위하여 폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 링크 시스템에 작용하는 하중 해석과 링크에 작용하는 응력 해석을 실시하였다.

폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 작동 원리를 분석하여 역학적으로 서로 다른 3 개의 모드로 구분하였으며, 각 모드에 대하여 힘의 평형 조건을 적용하여 링크 하중을 상하 금형과 펀치에 작용하는 하중과 상하 폐쇄하중의 함수로 표현하였다. 예제를 통하여 성형 중 링크 하중의 변화를 설명함으로써 폐쇄다이세트 개발 기술자와 응용 기술자들에게 링크 시스템의 거동 특성에 관한 직관을 갖도록 하였다. 그리고 링크에 작용하는 응력 분포를 탄성 접촉 문제로 구하였으며, 그 결과를 링크의 설계 및 운용 관점에서 토의하였다.

결론적으로, 링크의 구조 설계는 Mode 2 에서 즉 링크가 작동되었으나 금형이 폐쇄되지 않은 상태일 때, 링크에 작용하는 하중을 기준으로 실시

되어야 하며, 식 (2)에서 초기에 하부 금형하중이 상대적으로 매우 작기 때문에 하부 폐쇄하중을 링크 시스템에 부과된 설계 기준 하중으로 간주하여도 무방하다. 그리고 최대의 응력이 연결부의 접촉면에서 발생하므로 구조해석은 접촉문제로 처리되어야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Siegert, K., Kammerer, M., Keppler-Ott, Th. and Ringhand, D., "Recent Developments on High Precision Forging of Aluminum and Steel," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 71, pp. 91-99, 1997.
2. Yoshimura, H. and Tanaka, K., "Precision Forging of Aluminum and Steel," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 98, pp. 196-204, 2000.
3. Doege, E. and Bohnsack, R., "Closed Die Technologies for Hot Forging," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 98, pp. 165-170, 2000.
4. Park, J. J., Lee, J. H. and Lee, Y. S., "FEM Analysis of closed-Die Forging of a Bevel Gear," *The Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 20, No. 8, pp. 2458-2467, 1996.
5. Choi, J. C. and Choi, Y., "Precision Forging of Spur Gears with Inside Relief," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 1214-1222, 1999.
6. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E. and Baldoukas, A. K., "Simulation of the Precision Forging of Bevel Gears Using Implicit and Explicit FE Techniques," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 57, pp. 164-171, 1996.
7. Kondo, K. and Ohga, K., "Precision Cold Die Forging of a Ring Gear by Divided Flow Method," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, pp. 1105-1113, 1995.
8. Jun, B. Y., Park, R. H., Eom, J. G. and Joun, M. S., "Criterion on Enclosed Die Forging with a Double-Action Link-Type Hydraulic Die Set," *Proc. Of KSTP Spring Conference*, pp. 391-394, 2006.
9. Park, R. H., Jun, B. Y., Lee, M. C. and Joun, M. S., "Kinematic Analysis of a Double-Action Link-Type Die Set for the Enclosed Die Forging," *The Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 30, No. 11, 2006, in press.
10. Joun, M. S. and Lee, M. C., "Quadrilateral Finite-Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 4059-4075, 1997.