

폐쇄단조용 복동링크식 다이세트의 기구학적 해석

박래훈¹ · 전병윤² · 이민철³ · 전만수[#]

Kinematic Analysis of a Double-Action Link-Type Die Set for the Enclosed Die Forging

R. H. Park, B. Y. Jun, M. C. Lee, M. S. Joun

Abstract

In this paper, kinematic analysis of a double-action link-type die set for the enclosed die forging is carried out. Operational principle of the die set in the enclosed die forging is introduced in detail. A closed form solution of the relative velocity of the middle plate with respect to the upper plate is given. The effect of link lengths on both strokes and velocities is investigated.

Key Words : Enclosed Die Forging, Precision Forging, Link System, Die Set, Kinematic Analysis

1. 서 론

국내외의 자동차회사 및 부품회사에서는 경량화 기술, 고품질화 기술, 생산성 향상 및 제조원가 절감 기술 등에 투자를 확대하고 있다. 특히, 생산기술 측면에서는 피삭재의 절삭량을 최소화시키고, 생산공정에 자동화 기술을 접목하는 노력이 병행되고 있다. 이러한 추세에 따라 소재의 낭비를 줄이고 고품질을 유지하는 생산방법으로 소성가공, 특히 정밀정형성형 기술이 각광을 받고 있다. 더욱이 지구온난화 등 환경 문제의 악화, 자동차 보증기간의 확대, 부품 수의 축소 및 소형경량화 등의 세계적 추세로 말미암아, 정형단조에 의한 기어류 및 정밀기계 부품 제조 비중의 증가는 불가피하다. 우리나라의 경우, 국제 경쟁력을 확보하고 있는 단조기술의 우위를 지속적으로 유지하기 위해서 기술 선도와 파급 효과가 크고, 부가가치가 높은 기어류 및 정밀기계 부품의 정밀정형단조[1] 기술 개발이 보다 활성화되어야 한다.

기어류 및 정밀기계 부품의 정밀정형단조에 필요한 요소기술로는 폐쇄단조 및 관련 다이세트 기술, 최적 금형 설계 기술, CAE 해석 기술, 금형가공 기술, 금형 열처리 및 소재 기술, 품질평가 시스템 기술, 장비 및 생산 기술 등이 있다. 이러한 기술 중 일부는 현재 일본에 비하면 10년 이상 뒤떨어져 있는 실정이며[2], 국내의 기술 축적이 여러 기관 및 기업체에 분산되어 있어 개발 위험부담이 큰 차세대 단조공정 개발을 위한 역량의 결집이 불가능한 까닭으로 국제적 흐름에 효율적으로 대처하지 못하고 있다.

현재 국제적으로 널리 사용되고 있는 폐쇄단조용 다이세트(폐쇄다이세트라고도 부름)는 크게 니찌다이 형(NICHIDAI type)과 코마츠 형(KOMATSU type)이 있다[2]. 니찌다이 형은 링크를 사용하는 방식으로 시스템이 단순하며 강도 확보가 용이하고 다이세트의 평형도 조절이 양호하여 가공 정도가 좋은 장점이 있으므로 가장 널리 사용되고 있다. 반면 코마츠 형은 랙과 피니언을 사용하는

1. 경상대학교 대학원 기계공학과
2. 경상대학교 대학원 기계공학과, 진ENG
3. 경상대학교 항공기부품기술연구소
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

방식으로 제품의 정도가 기어의 정도에 영향을 많이 받으며, 상형과 하형의 속도비가 2:1 로 일정하다. 니찌다이 형은 상하의 링크 길이를 변경시킴으로써 상부와 하부의 속도를 다양하게 변화시킬 수 있는 장점도 있다. 우리나라의 단조업계에 폐쇄단조를 실시하는 업체는 극소수이고 대부분 니찌다이 형의 폐쇄단조용 다이세트를 사용하고 있다. 우리나라는 이 분야에서 단순 모방 수준에 머무르고 있다.

폐쇄단조용 다이세트는 일반 다이세트에 비하여 매우 복잡한 기구학적 및 역학적 특성을 지니고 있다. 폐쇄단조용 다이세트를 활용하기 위해서는 먼저 기구학적 및 역학적 해석이 이루어져야 한다. 지금까지 폐쇄단조용 다이세트를 이용한 기어류의 응용연구는 링크시스템을 제외한 연구와 단동식 폐쇄다이세트에 관한 연구가 많았다. 비록 정밀정형단조 및 폐쇄단조에 관한 응용연구가 다수의 연구자들[3-7]에 의하여 이루어졌지만 링크시스템과 연관된 문헌이 발표된 바가 없으므로 체계적인 연구가 폐쇄단조용 다이세트의 개발과 활용의 양면에서 절실하다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 폐쇄단조의 필수조건인 폐쇄단조용 복동링크식 폐쇄다이세트의 작동원리를 소개하고 기구학적 해석을 실시함으로써 관련 기술의 개발 및 응용 기술의 고도화에 이바지하고자 한다.

2. 폐쇄단조용 복동링크식 다이세트의 작동 원리

폐쇄단조용 복동링크식 다이세트에서 폐쇄하중을 유압모터를 사용하여 발생시킬 경우, 복동링크유압식이라고 부른다. Fig. 1 은 복동링크유압식 폐쇄단조용 다이세트의 개념도와 각 구성품의 명칭을 나타낸 것이다. 폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트는 크게 상부, 중부, 하부 등으로 나누어져 있다. 상부는 슬라이더(slidebar), 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(upper punch) 등으로 구성되어 있다.

링크 시스템은 상부의 운동과 연계된 중간판의 운동을 통제하고 이 운동에 필요한 힘을 전달한다.

상부와 하부의 유압실린더는 폐쇄 이전에는 금형과 다이세트간의 상대운동을 방지하는데 필요한 하중 또는 성형하중을 지탱하며 상부와 하부의 금형이 폐쇄된 이후 이를 유지하는데 필요한 폐쇄하중을 지탱한다. 상하부 편치는 금형이 폐쇄된 후 소재를 밀폐된 금형 공간에 채움으로써 소재를 원하는 형상으로 성형하는 역할을 담당한다.

Fig. 2 는 폐쇄단조에 필수적인 복동링크유압식 폐쇄단조용 다이세트의 작동 원리를 개념적으로 나타낸 것이다. 슬라이더가 하강하면, 먼저 상판과 링크가 접촉하게 된다. 이 때부터 상부와 링크 시스템에 의하여 부가된 속도로 상형과 하형이 닫힐 때까지 하강한다. 이 과정에서 소재는 변형을 받을 수도 있고, 변형을 안받을 수도 있다. 이 과정에서 받은 소성변형은 일반 단조의 변형과 동일하다. 일단 상형과 하형이 닫혀지면, 상형과 하형의 속도는 중간판의 속도와 동일하게 되며, 상형과 상편치간의 상대운동이 발생하게 된다. 그 결과, 상하부의 편치가 상대운동에 의하여 소재에 성형하중을 가하게 된다. 이 때 상형과 하형에 작용하는 분리력(enclosed die separating force), 즉 상금형 하중과 하금형 하중은 유압 또는 스프링 등에 의하여 지탱된다.

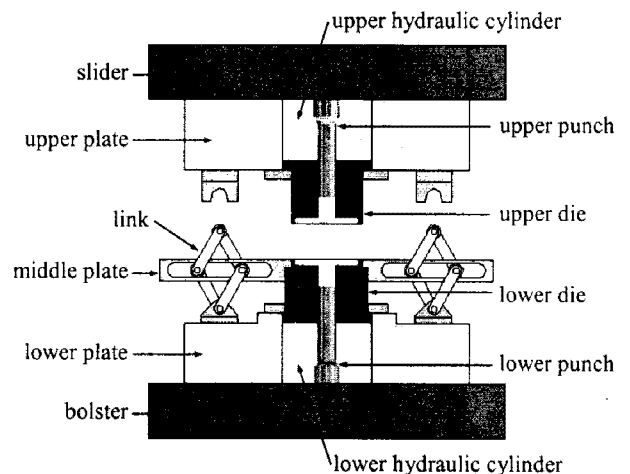


Fig. 1 Conceptual drawing of the enclosed die Forging die set

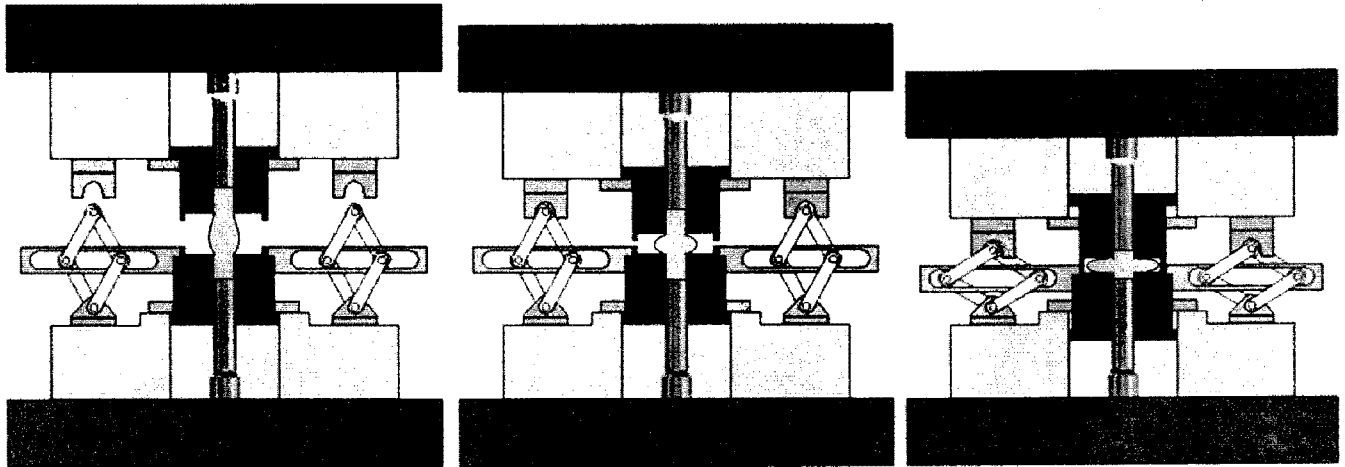


Fig. 2 Operation of the enclosed die forging die set from the top to the bottom

3. 폐쇄단조용 복동링크식 다이세트의 기구학적 해석

Fig. 3은 링크 시스템의 운동을 나타낸 것이다. 링크 시스템은 4개의 연결부 즉, 레볼루트 조인트(revolute joint) 또는 핀연결부(pin-connected joint)와 4개의 링크로 구성되어 있다. 그림에서 연결부 U 는 상판 또는 슬라이더(slidebar)에 연결되어 있으며, 연결부 L 은 중간판에 연결되어 있고, 연결부 B 는 하판 또는 볼스터(bolster)에 연결되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 a 와 b 는 폐쇄 개시 시점에서의 연결부간의 상대높이를 나타내고, D_U 와 D_L 은 폐쇄 개시 이후 상형과 하형의 이동거리를 각각 의미한다.

a , b , D_U , D_L 등의 관계[2]는

$$l_2^2 - a^2 = l_1^2 - b^2 \quad (1)$$

$$l_2^2 - (a - D_U + D_L)^2 = l_1^2 - (b - D_L)^2 \quad (2)$$

이므로

$$D_L = \frac{(2a - D_U)}{2(a + b - D_U)} D_U \quad (3)$$

이다. 여기서 l_1 와 l_2 는 하부 링크와 상부 링크의 길이를 각각 의미한다.

만약 a 와 b 가 동일하면, 즉 두 개의 링크의 길이가 동일하면, 식 (3)으로부터 a 와 b 에 상관없이 $D_L = D_U/2$ 임을 알 수 있다. 이 모델을 Case 1로 한다. 그리고 Table 1에서 정리되어 있는 바와 같이, 상부의 링크의 길이가 긴 경우($l_1 = 144.48\text{mm}$, $l_2 = 171.91\text{mm}$, Case 2라고 함), $a = 156.07\text{mm}$, $b = 125.12\text{mm}$, $D_U = 20.00\text{mm}$ 일 때, D_L 은 11.19mm 가 된다. 그리

고 상부의 링크 길이가 짧을 경우($l_1 = 144.48\text{mm}$, $l_2 = 123.76\text{mm}$, Case 3이라고 함), $a = 100.50\text{mm}$, $b = 125.12\text{mm}$, $D_U = 20.00\text{mm}$ 일 때, D_L 은 8.81mm 가 된다. 전술한 내용을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Three different cases of the link system and their working conditions

	Case 1	Case 2	Case 3
l_1	144.48 mm	144.48 mm	144.48 mm
l_2	144.48 mm	171.91 mm	123.76 mm
a	125.12 mm	156.07 mm	100.50 mm
b	125.12 mm	125.12 mm	125.12 mm
D_U	20.00 mm	20.00 mm	20.00 mm
D_L	10.00 mm	11.19 mm	8.81 mm

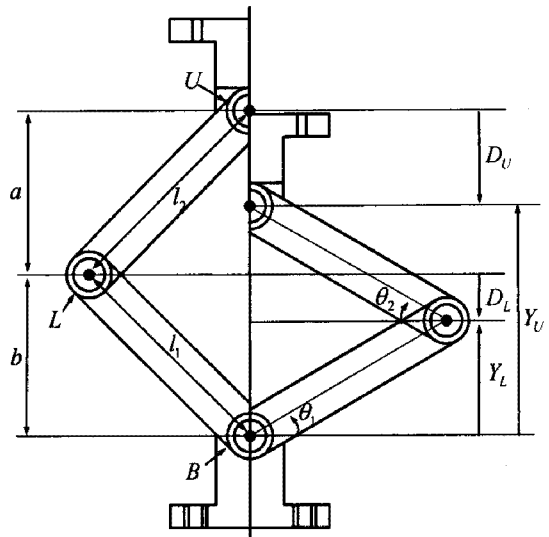


Fig. 3 Mechanism of the link system

한편, Fig. 3 에서 정의된 링크의 각도 θ_1 과 θ_2 의 관계는 다음과 같다.

$$l_1 \cos \theta_1 = l_2 \cos \theta_2 \quad (4)$$

식 (4)의 양변을 시간에 대하여 미분하면, 각속도 $\dot{\theta}_1$ 와 $\dot{\theta}_2$ 의 관계를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_2 = \frac{l_1 \sin \theta_1}{l_2 \sin \theta_2} \dot{\theta}_1 \quad (5)$$

그리고 하형의 높이 Y_L 과 상형의 높이 Y_U 는 각각

$$Y_L = l_1 \sin \theta_1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Y_U &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \\ &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} \\ &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{l_2^2} \cos^2 \theta_1} \end{aligned} \quad (7)$$

이고, 식 (7)로부터

$$\sin \theta_1 = \frac{l_1^2 - l_2^2 + Y_U^2}{2Y_U l_1} \quad (8)$$

이다.

그러므로 하형의 속도 V_L 과 상형의 속도 V_U 는 각각

$$V_L = \dot{Y}_L = l_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_U &= \dot{Y}_U = l_1 \cos \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1 + l_2 \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2 \\ &= l_1 (\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \cot \theta_2) \dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (10)$$

로 표현되고, 상형과 하형의 속도비는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{V_L}{V_U} = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \sin \theta_1 \cot \theta_2} \quad (11)$$

한편, 다음의 관계식을 식 (11)에 대입하여 정리하면,

$$\cot \theta_2 = \frac{\cos \theta_2}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}} = \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{\frac{l_2^2}{l_1^2} - \cos^2 \theta_1}} \quad (12)$$

상형과 하형의 속도비는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{V_L}{V_U} = \frac{1}{1 + \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{\frac{l_2^2}{l_1^2} - \cos^2 \theta_1}}} \quad (13)$$

식 (8)를 식 (13)에 대입하여 정리하면, 속도비는 다음 식과 같이 링크의 길이와 상부의 연결부 U 와 하부의 연결부 B 의 높이 차이의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{V_L}{V_U} &= \frac{1}{1 + \frac{Y_U^2 + l_1^2 - l_2^2}{Y_U^2 - l_1^2 + l_2^2}} \\ &= \frac{1}{2} + \frac{l_2^2 - l_1^2}{2Y_U^2} \end{aligned} \quad (14)$$

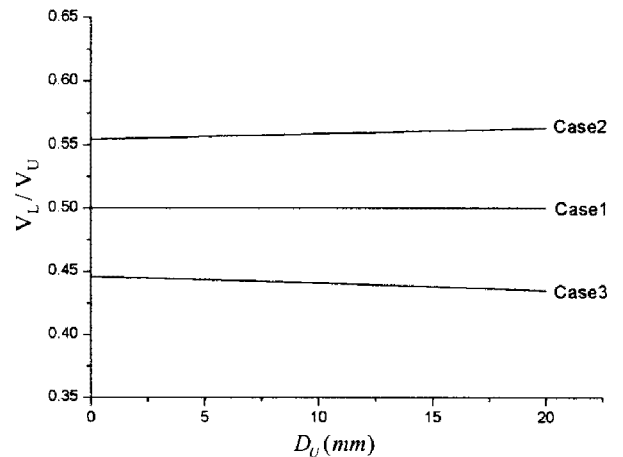


Fig. 4 Velocity profiles

식 (14)로부터 만약 링크의 길이가 동일하면, 하급형의 속도는 상급형의 속도의 절반임을 알 수 있다. 그리고 상부 링크의 길이가 크면, 속도비는

증가하며, 하강할수록, 즉 상부와 하부의 높이 차이가 작아질수록 속도비는 증가함을 알 수 있다. 반대로 하부 링크의 길이가 크면, 속도비는 감소함을 알 수 있다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 Table 1 에서 정의한 링크 시스템과 공정 조건에 대하여 속도비를 Fig. 4 의 그림에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 링크의 길이 차이로 인하여 속도비가 0.5 를 전후하여 변화함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐쇄단조용 복동링크식 다이세트의 기구학적 해석을 실시하였다. 이를 위하여 폐쇄단조용 복동링크식 다이세트의 작동 원리를 소개하였고, 다이세트의 상부의 행정과 중간판의 행정 간의 관계 식을 소개하였으며, 상부와 중간판 간의 속도비를 링크의 길이와 상부의 높이의 함수로 표현하였다.

본 연구 결과는 폐쇄단조용 복동링크식 폐쇄다이세트의 작동원리 이해와 공정설계에 매우 유용한 정보를 제공할 것이며, 특히 폐쇄단조의 유한요소해석에 필수적인 기구학적 정보를 제공하는 등 폐쇄단조용 복동링크식 다이세트의 응용기술 발전에 이바지할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국산업기술재단에서 지원한 지역혁신인력양성사업 및 2006 년도 지방대학혁신역량강

화사업(NURI)의 일환으로 실시된 연구 결과의 일부임.

참 고 문 헌

- [1] K. Siegert, M. Kammerer, Th. Keppeler-Ott, D. Ringhand, 1997, Recent developments on high precision forging of aluminum and steel, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 71, pp. 91~99.
- [2] H. Yoshimura, K. Tanaka, 2000, Precision forging of aluminum and steel, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 98, pp. 196~204.
- [3] E. Doege, R. Bohnsack, 2000, Closed die technologies for hot forging, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 98, pp. 165-170.
- [4] 박종진, 이정환, 이영선, 1996, 베벨기어 폐쇄단조의 유한요소해석, 대한기계학회논문집(A), 제 20 권 제 8 호, pp. 2458~2467.
- [5] J. C. Choi, Y. Choi, 1999, Precision forging of spur gears with inside relief, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 42, pp. 1214~1222.
- [6] A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, A. K. Baldoukas, 1996, Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 57, pp. 164-171.
- [7] K. Kondo, K. Ohga, 1995, Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, pp. 1105~1113.