

소성가공에 있어서의 금형수명

최 재찬, 김 병민
부산대학교 기계설계공학과

Tool life in Metal Forming Processes

J.C. Choi, B.M. Kim
Department of Mechanical Design Engineering
Pusan National University

ABSTRACT

The service life of tools in metal forming technology is to a large extent limited by wear and fatigue fracture of the active elements. This presents a basic request for tool cost minimization and reduction of extensive machine down time, caused by premature tool failure.

Currents developments are dominated by steps to reduce the causes of tool failure. A main problem of forming technology remains the insufficient reliability of tools due to a large and incalculable life time fluctuation. Only a systematic investigation of the failure mechanisms and operational loading of tools can lead to future improvements in tool layout, that is optimization of tool usage.

1. 서 론

최근에 신소재의 개발과 더불어 복잡한 형상을 가진 부품들에 대하여 정형 (Net or Near Shape)가공으로 생산하는 새로운 단조 기술개발이 시도되고 있으며, 아울러 제품의 제조 비용의 절감을 위해서도 많은 노력을 들이고 있는데 이들은 가공기계와 소재의 중간위치에 있는 금형의 설계 및 가공의 양부여하에 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 금형의 품질은 최종제품의 품질에 직접적으로 영향을 미치고 금형제작 비용은 대체적으로 제조비용의 5%에서 30%까지 차지하여 초기 금형제작과 설치비용이 상대적으로 높아 대량생산일 수록 경제적이다. 소량생산에서는 금형교환시간이 실제 기계가동 시간을 훨씬 능가하므로 개당 생산단가가 현저히 증가한다. 매번 금형이 교체될 때 다음 세가지 형태의 비용을 생각할 수 있다 [1].

- 기계해체 시간에 대한 비용
- 설치 및 재가동 또는 교체된 금형의 손질
- 금형의 이동과 조립의 비용

그 예로써 그림(1)과 같은 냉간단조에 의한 다단축제품의 생산용 금형 보수비용관계를 보면 알 수 있다 [2]. 따라서 금형의 사용시간 증가, 즉 금형의 수명 연장시키는 일은 제품제조단가의 절감을 가져오게 되는 뜻이다. 금형수명에 영향을 미치는 인자는 너무나 많기 때문에 지금까지의 연구는 주로 경험적인 분야에만 제한되어 왔으며 인자들간의 상호연관성 및 체계적인 접근은 이루어지지 않고 있으며 금형의 수명을 예측한다는 것은 더욱 미흡한 단계에 있다. 금형이 첫번째 스트로크에서 파손되지 않을때 그것이 얼마나 오래 제역활을 할지 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 금형 설계를 수행할때 기대되는 금형 수명을 예측한다는 것은 금형과 제품의 최종 형태의 비용을 평가하는 측면에서 설계자에게 매우 중요하다. 따라서 본 해설에서는 소성가공에서 특히 단조공정을 중심으로 금형의 수명에 미치는 인자들의 영향에 대하여 K. Lange 교수 논문 [3]의 많은 부분을 참고로하여 언급하고자 한다.

2. 금형파손의 원인

소성가공에 있어서 금형수명은 다음과 같은 금형파손의 원인에 의해 제약을 받는다 [4,5].

- 파단(Fracture)
- 소성변형(Plastic Deformation)
- 마모(Wear)
- 기계적 및 열적 피로(Mechanical and Thermal Fatigue)
- 표면용착(Surface welding)
- 기타

일반적으로 소성가공공정의 종류에 따라 그림(2)와 (3)과 같이 금형에 대한 손상의 빈도와 그로 인한 비용은 상이하다. 파단은 냉간단조에서 금형파손의 주원인이며, 열부하와 가공공정동안에 고온재료와의 접촉은 온간 및 열간단조에서 파손의 가장 흔한 원인인 마모를 일으킨다.

그림(4)와 같은 금형의 파단은 냉간단조제품의 생산에서 주된 위험 인자이다. 왜냐하면 금형의 교체뿐만 아니라 자동프레스 장치에서 파단된 금형에 의해 발생될 수 있는 충격에 의해 비용이 증가되기 때문이다. 특히 마모에 강한 금형재료, 즉 높은 경도와 낮은 연성을 가진 재료는 순간적인 파괴나 피로에 의해 상당한 파손 위험을 가진다. 적절한 금형설계시 이러한 위험을 고려하는 것과 파손 기구에 대한 지식, 부하상태, 가공물과 금형사이의 상호작용에 관련된 지식이 필요하다. 금형설계시 대부분의 경우 해석적 방법보다는 경험적인 방법에 의해 설계한다. 따라서 금형설계를 위해 FEM과 같은 해석도구가 필요하며 FEM시뮬레이션으로 얻는 응력 변형을 결과로부터 다양한 금형파손기구를 이해하고 피할 수 있다. 게다가 이러한 결과들은 금형설계 최적화 및 수명 예측을 하기 위한 파괴기구 해석시 기본적인 정보로 이용된다 [6,7,8,9].

표면손상의 주류는 마모이다. 이것은 온간 및 열간단조에 사용되는 금형의 긁힘(Scraping)의 주원인이 된다. 마모는 성형부품의 표면상태와 공차에 큰 영향을 부고, 결과적으로는 금형의 수명에 영향을 주게 되는데, 일반적으로 이 현상은 아주 복잡하고 수 많은 인자와 메카니즘을 포함하고 있다 [11,12,13].

3. 금형수명 관련 인자

금형수명에 미치는 복잡한 인자간의 상호관계를 알아보기 위해서는 다음과 같은 내용의 전체 성형시스템에 대해 파악하는 것이 중요하다 [1](그림5참조).

- 금형과 소재 접촉면의 윤택상태
- 금형재질(내마모성, 경도, 파괴인성등)
- 열처리(냉각 및 가열)
- 금형형상(다이각, 필렛 및 코너반경, 금형변형, 표면상태)
- 금형설계
- 소재재질
- 제품(공차, 표면조도)
- 금형제작

이상과 같이 성형공정의 다양한 인자의 영향을 설명하는데 있어서 가장 큰 제한 요인은 이들사이의 복잡한 상호관계이다. 예를들어, 윤택상태는 금형과 소재사이의 접촉면을 변화시킬 뿐만아니라, 마찰상태에서 속도장, 수직 및 접선응력, 접촉면속도, 표면의 온도상태와 성형압력등의 변화의 원인이 된다. 성형에너지의 증가는 높은 금형온도를 유발한다. 소재와 금형사이의 마찰에 의한 추가적인 온도상승은 내압가공소재의 국부 표면온도를 극한적으로 뜨임온도까지 증가시킬 수 있으며, 특히 열간단조에서는 이러한 모든 현상은 마모에 의한 현저한 점착과 결합된다. 금형수명에 있어서 또 다른 차원은 인적요소와 전통적인 생산 방식과 문화에 관련되어 왔는데 결론적으로 공장과 무관한 금형의 수명 판단은 항상 불확실한 원인이 되기도 한다.

대략적인 전체적 구조는 그림(6)과 같고 두가지 예에 대해서 설명하면 (1) 불량한 윤택, 예열 또는 냉각은 단조다이의 조기 영구변형이나 열적피로(thermal fatigue)를 일으킬 수 있는 온도증가의 원인이 되거나 (2) 소재 온도의 편차는 마찰과 마모의 증가를 일으켜 표면산화(oxidation) 또는 접촉압력의 증가, 금형요소의 높은 응력과 그로인한 마모 또는 파단의 원인이 된다.

동일한 개발환경에서 동일하게 설계된 금형에 대해 파손의 종류 또한 다양하다. 간단한 제품의 대량생산에서 파손의 주원인이 마모인 반면에 높은 하중이 작용하는 냉간압출금형는 항상 파단된다. 냉간 압출에서 금형의 전형적인 파손 비율은 80%가 파단에 의한 것이고, 단지 20%정도만이 마모의 원인에 의한 것이다. 그림(7)은 일반화된 파손모형을 설명하고 있다. 이 모형에 의하면 모든 파손의 형태는 금형제작중에 동시에 시작된다. 마모, 표면의 거칠어짐, 소성변형과 크랙성장은 결정론적이지만, 미세크랙의 형성은 항상 그 가능성을 내포하고 있다. 따라서 금형의 초기상태로부터 현저한 파손에 이르는 경로는 금형설계와 제작시의 특정 인자뿐만아니라 금형의 전체적인 이력에 관계된다.

4. 금형수명의 향상과 피로파괴의 평가

금형수명과 품질 향상에는 일반화된 방법이 없으며 금형수명의 영향인자 각각에 대하여 금형의 사용시간을 증가시킬 수 있는 가능성만 단지 포함하고 있을 뿐

이다. 금형수명을 향상시키기 위한 최근의 몇가지 예를 들면 다음과 같다 [1].

4.1 금형설계

성형해석용 강소성 유한요소법과 금형해석용 탄소성 유한요소법을 이용하여 금형의 세분화된 응력을 구하여 응력집중부의 크랙생성을 지연시켜 피로수명을 증가시키기 위한 최적 금형형상설계 [14]로 STRECON(Strip wound Prestressed container)사용 [15]으로 높은 예응력을 다이인서트에 작용시킴으로써 금형수명의 현저한 증가를 가져 올 수 있다.

4.2 금형제작

금형제작의 전체적 이력과 조립은 금형수명에 아주 중요한 역할을 한다. 일반적으로 단조금형의 제작은 EDM과 Wire cut EDM(WEDM) 가공에 의해 발생하는 금형표면의 백색의 취성 크랙형성을 감소시키기 위한 새로운 금형제작기술 개발에 노력하고 있다 [16,17].

4.3 금형재료 및 표면처리

금형재료의 열처리 방법 개선과 금속학적 방법에 의한 높은 피로강도를 가지면서 내마모성도 향상 될 수 있는 새로운 금형재료개발 [18]과 냉간단조 금형용으로 플라즈마를 이용한 PVD기술에 의한 코팅기술 및 온간단조 금형용에 채용된 활성화 코팅 방법인 Lazer Alloying기술개발 [19,20]등은 국부적인 높은 하중에서 크랙 성장을 방지하는데 크게 기여하고 있다.

4.4 피로파괴의 평가 및 수명예측

단조금형에서 피로파괴가 10^5 개의 부품이 생산되기전에 일어나는 저사이클 피로가 지배적이다 [21]. 저사이클 피로는 하중이 작용하고 있는 상태에서 진전하는 국부적인 소성영역에 의해 특징지워진다.

크랙의 형성은 다음 네가지 단계로 일어난다.

- 1) 소성영역에서 크랙 시작
- 2) 미소크랙성장
- 3) 파괴시험에 의해 발견될 수 있는 미소크랙성장
- 4) 갑작스런 크랙성장에 의한 파손

금형 임계영역에 초기 크랙이 존재한다고 가정하면, 핵심문제는 초기크랙이 임계길이보다 안정적인지 아니면 그렇지 않은지이고, 성형공정에서 어떤 임계길이까지 금형을 사용할 수 있는지이다.

다음은 피로 수명 예측을 위하여 제시된 FEM시뮬레이션 절차이다 [22].

- 1) 강소성 유한요소법등에 의한 성형해석 결과로부터 금형작용응력 계산
- 2) 계산된 작용응력에 의한 금형의 탄성해석
- 3) 가장 높은 인장응력이 작용하는 Gauss점을 찾는다.
- 4) Gauss점에 초기 크랙을 위치시킨다.
- 5) 금형의 재해석
- 6) 응력확대계수범위 $\Delta K_I, \Delta K_{II}, \Delta K_e$ 의 결정

- 7) 크랙선단부의 인장응력이 최대가 되는 크랙 성장의 각도 (θ°) 계산
- 8) 계산된 θ° 방향으로 임의의 작은 증분으로 크랙확장
- 9) 금형의 재해석
- 10) 새로운 응력확대계수의 범위 $\Delta K_I, \Delta K_{II}, \Delta K_e$ 계산
- 11) 크랙길이, 응력 확대계수등의 앞의 모든 값들로부터 크랙 길이 a에 대한 최소자승 다항식의 등가응력확대계수 ΔK_e 을 얻는다.
- 12) 위의 다항식으로 Paris법칙과 Forman의 법칙에 대입하여 적분, 이것을 통해 크랙 길이 a에 대한 하중주기에 대한 다항식을 얻는다.
- 13) 원하는 크랙길이나 파괴수명까지 8번으로가서 반복계산

상기와 같은 FEM시뮬레이션에 의한 단조 금형수명예측은 아직은 시작단계에 있지만 앞으로 이 분야에 많은 연구가 이루어지리라 본다.

5. 결 론

지금까지 소성가공에 있어서의 금형수명에 대하여 개략적으로 언급하였다. 금형수명에 미치는 영향은 아주 복잡하여 아직까지 체계적인 연구가 이루어지지 못하고 있기 때문에 앞으로 이분야에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 이러한 결과들은 금형설계자에게 보급됨으로써 초기금형설계시부터 금형수명을 향상시키는데 기초자료가 되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. Lange, K., 1985, Cost Minimization in Small Quantity Production of Stepped Shafts by Combined NC-Radial Forging and NC-Turning - A New Approach to Flexible Manufacturing Systems. Annals of the CIRP, 34/2/1985.
2. Bariani, P.F., D'Angelo, L., Knight, W.A., 1991, Computer Aided Economic Process Design for Cold Forged Parts. Proc of Int. Forum on Design for Manufacture and Assembly, June 1991, Newport, R.I.
3. K. Lange, L. Cser, M. Geiger, J.A.G. Kals, 1992, Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming. Annals of the CIRP, 41/2/1992.
4. Doege, E., 1977, Maschinen für die Warmumformung und Blechformung. 9. Umformtechnisches Kolloquium, Hannover, S. 155-167
5. Geiger, R., 1979, System zum Erfassen und Senken des Werkzeugverbrauchs beim Kaltmassivumformen. wt -Z. ind Fertigung, 69(1979) 12, S. 763-769.
6. M Geiger, M Hansel and T Rebhan, 1992, Improving the fatigue resistance of cold forging tools by FE simulation and computer aided die shape optimization. Proc. Instn. mech. Engrs. Vol. 206.

7. Jones, R. L., phoplonker, M. A. and Byrne, J. Local strain approach to fatigue crack formation life at notches. *Int.J.Fatigue*, 1989, 11 (4), 255-259.
8. Kocanda, A. Steel for warm working—an evaluation of resistance to cyclic loading. *Proc. Advanced Technol. of Plasticity*, 1990, 1, 349-354.
9. Kurt Lange, Arndt Hettig and Markus Knoerr, 1992, Increasesign tool life in cold forging through advanced design and tool manufacturing techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 35 (1992), pp. 495-513.
10. Bay, N., 1985, Friction and adhesion in metal forming. Doctoral Thesis, University Lyngby, Denmark.
11. Dautzenberg, J.H., van Dijck, J.A.B., Kals, J.A.G., 1989, Metal structures by friction in mechanical working processes. *Annals of the CIRP*, 38/1/1989, pp. 567-570.
12. Dautzenberg, J.H., Kals, J.A.G., 1986, A model for vibrations during dry sliding friction. *Annals of the CIRP*, 35/1/1986, pp. 417-420.
13. Kramer, B.M., Judd, P.K., 1985, Computational design of wear coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology*. Vol. A3, pp. 2439-2444.
14. Kusiak, J. and Thompson, E. G. Optimization techniques for extrusion die shape design, *Numiform 89*, 1989 (Balkema, Rotterdam).
15. Groenbaek, J., 1990, Stripwound cold forging tools - a technical and economical alternative. *Proc. of the 8th Int. Cold Forging Congress*, 1990, Nuremberg, Germany, VDI-Verlag.
16. N.N., Metamorphosed layer of steel surface due to EDM. Technical Doc. No. 248, Hitachi Metals, Yasuki Work, (in Japanese).
17. N.N., Troubles Caused by Wire-Cut EDM of Tools and Their Remedics. Hitachi Metals. Division of Special Steels (in Japanese).
18. YSS-YXR3, Data Sheet 278, Hitachi Metals Ltd.
19. ICFG 91., Coating of Tools for Cold Bulk Metal Forming.
20. Mattox, D.M., 1964, Film deposition using accelerated ions. *Electrochem. Technology*, 1 (1964), pp. 295-298.
21. G. Sehroder, Application of fracture mechanics to life prediction of forging tooling,(in German), K. Lange (Ed.), *Seminar Neuere Entwicklungen in der Massivumformung*, Forschungsgesellschaft Umformatechnik, Stuttgart, 1983.
22. V.E.Saouma, I.J.Zatz, 1984, An Automated finite element procedure for fatigue crack propagation analyses, *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 20, No. 2, pp. 321-333, 1984.

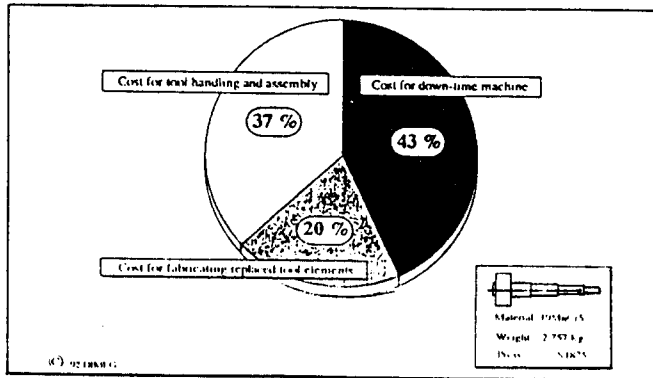


Fig. 1 Breakdown of tool maintenance costs for a forged shaft processed on a 5-station transfer machine

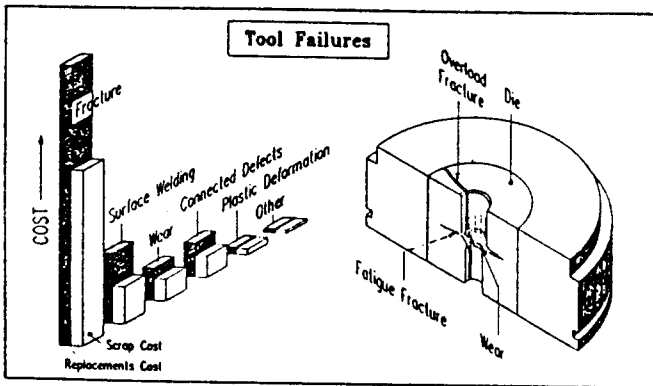


Fig. 2 Typical tool failure in cold extrusion

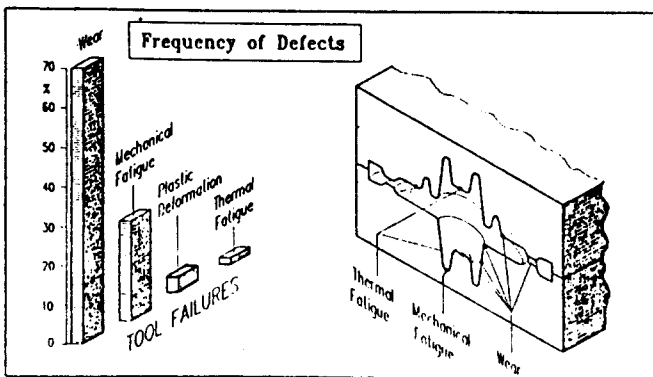


Fig. 3 Typical tool failure in warm bulk forming

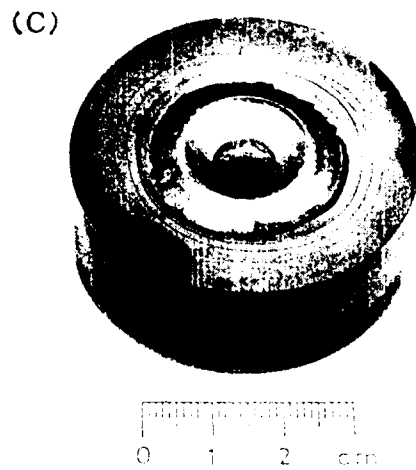
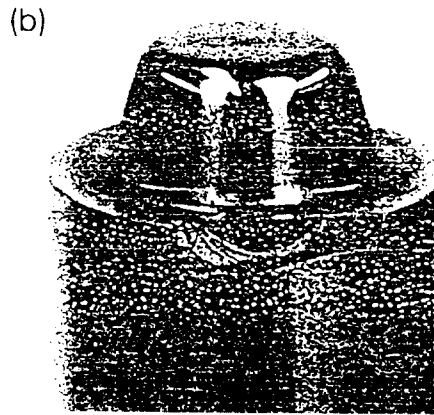
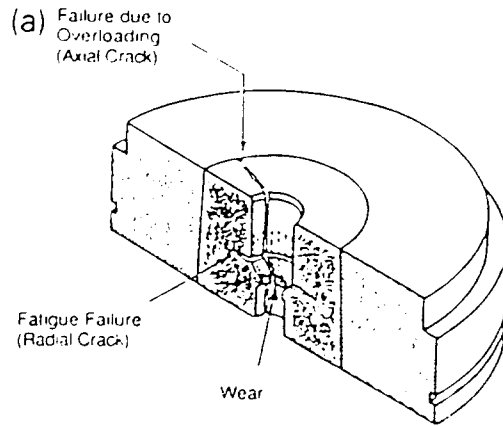


Fig. 4 Failures of cold-forging tooling: (a) schematic of failure types in a forward extrusion die; and (b) fatigue of the punch (c) die in cold forging.

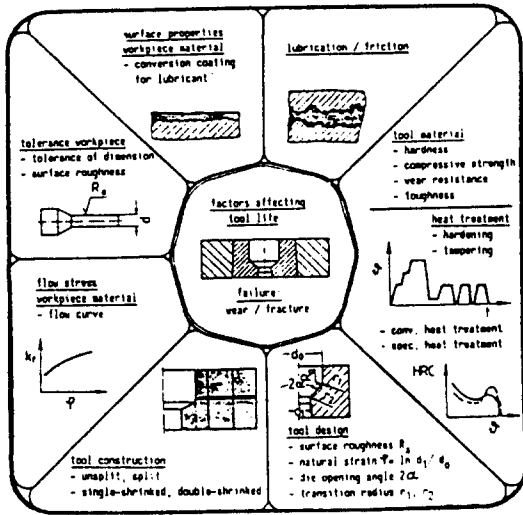


Fig. 5 Different aspects of the tool, workpiece and forming process, determining tool life affecting wear and fracture behaviour of the tool

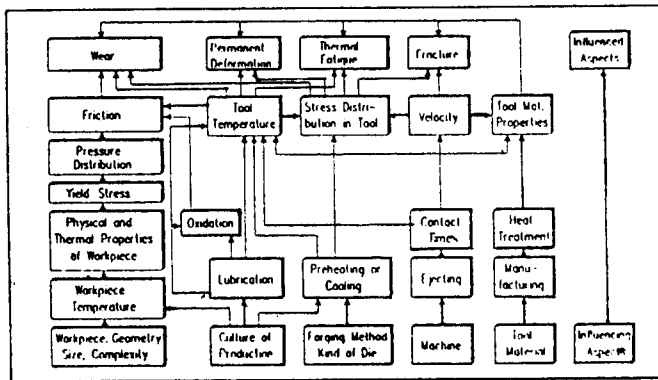


Fig. 6 Tool life and tool quality - factors influencing the tool life

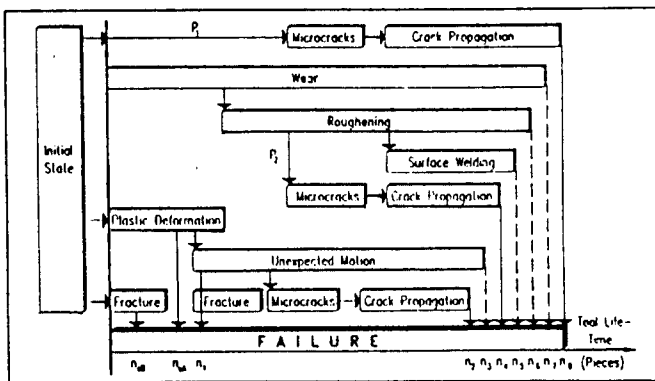


Fig. 7 Paths leading to defects