

냉간단조 생산성 향상 사례

최석탁¹, 이일환¹, 권용철², 이정환², 이영선²

Case studies for productivity enhancement on cold forging

S.T. Choi, I.H. Lee, Y.C. Kwon, J. H. Lee, C. M. Lee

ABSTRACT

The characteristics of the tool system give many effects into the costs and qualities for the finished components. Therefore, a tool life is one of the important issues on cold forging industry. However, since variables related with tool life are many complicated, the studies for solution should be investigated by the systematic research approach. The shape and process changes of die, the hardness changes of material and the tolerance of dies to decrease the die stress are analyzed by the FEM software. The heat-treatment of tool material is investigated to improve the tool life. Deep cryogenic treatment of tool steel is very efficient to improve the wear resistance due to the fine carbide. And, it is investigated that the shape and dimension of tool give effect into both tool life and quality of forged product..

Key Words : Finite element method (유한요소해석법 FEM), Tool life (금형 수명), Bevel Gear (베벨 기어), Flow stress (유동 응력), Cryogenic Treatment(극저온처리)

1. 서론

단조 공정을 거쳐 제조되는 자동차용 부품들은 대부분 고강도의 구조용 및 구동 부품들로서 자동차의 안전성, 승차감과 소음과 같은 자동차의 성능과 품질에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 자동차 시장의 발전과 자동차 회사 간 경쟁 우위를 점유하기 위해 자동차 회사는 자동차용 단조 부품의 품질 향상과 함께 지속적인 원가 절감을 요구하고 있다. 따라서, 부품 제조회사와 자동차 회사 모두 생산성 향상을 위한 노력은 계속될 수 밖에 없는 과제이다. 이와같은 요구에 대응하기 위해 1980 년대부터 본격적으로 발전되기 시작한 정밀 단조 기술은 Fig. 1 에 나타나 있는 바와 같이 최종 제품에 최대한 가까운 형상과 치수를 단조품에서 부여함으로써 단조 후 추가 공정을 삭감하고 원가를 절감하고자 노력하여 최근에는 무절삭 정밀 단조품(Net Shape Forged Part)을 실현하고 있는 사례가 증가하

고 있다. 그러나, 정밀 단조(Precision Forging)를 추구함에 따라 발생하는 문제점들 또한 증가되고 있는 추세이다. 그 가운데 대표적인 것은 금형 수명으로, 가공 공차와 난 성형 형상으로 단조를 수행함에 따라 금형에 가해지는 응력은 계속적으로 증가됨으로써 단조 부품 전체 가격은 감소되는 반면에 단조품의 제조 원가는 증가되는 경향을 보이고 있다. 따라서, 단조회사들은 원자재 가격 증가와 단조품 가격 하락으로 인해 양측으로 부터 부담을 안고 문제를 해결해야 하는 입장에 처해있다.

단조회사와 관련 산업의 경쟁력 확보를 위한 생산성 향상 기술의 개발은 현재 당면 과제 가운데 가장 중요한 핵심으로 이는 국내 뿐만 아니라 자동차산업 육성 국가들은 동일한 문제 인식하여 Fig. 2 와 같은 기술 개발 목표를 제시하고 있다. 이상의 목표들 가운데 본 연구에서는 금형수명 향상을 통한 생산성 향상을 위해 CAE 기술과 열처리 공정개선에 대한 개발결과를 정리하였다.

1. ㈜ 티에이케이

2. 한국기계연구원 신기능재료연구본부 소재성형연구센터

*. 교신저자: 이영선, lys1668@kmail.kimm.re.kr

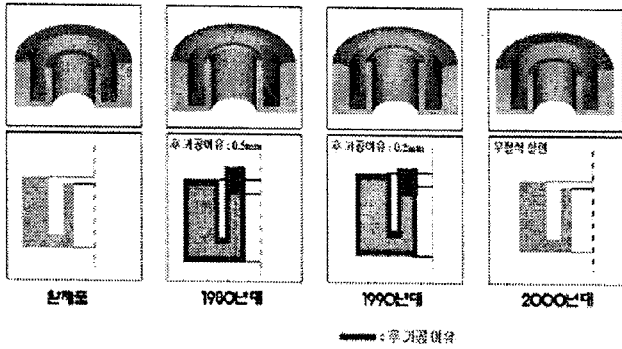


Fig. 1 Die stress analysis process of rigid-plastic FEM.

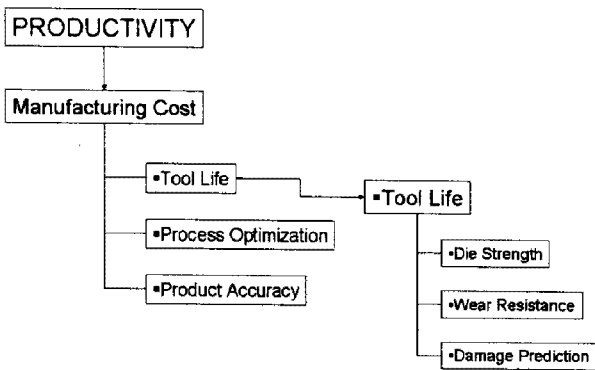


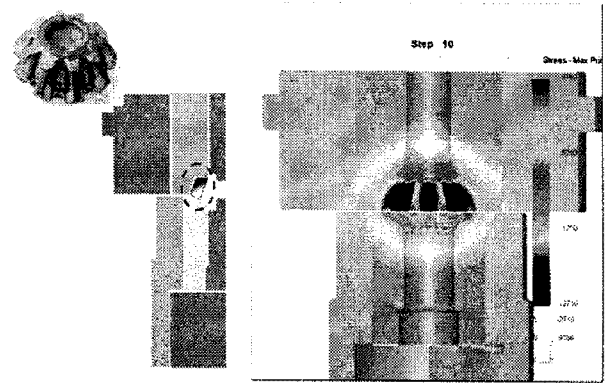
Fig. 2 Productivity and its affecting parameters

2. 공정 및 금형설계의 영향

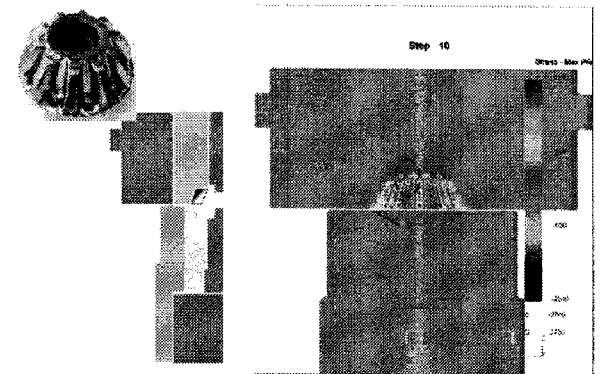
냉간단조용 금형은 금형소재의 인장강도에 50~60% 수준의 하중이 가해지기 때문에 안정된 수명을 위해서는 소재 특성에서부터 금형의 형상을 적히 설계해야 하는 등 많은 변수들에 대한 연구가 필요하다. 본고에서는 금형 소재 특성에 대한 것 외에 중요한 사항인 금형 형상과 치수 등 설계적 차원에서 수명을 향상시킬 수 있는 기술을 유한요소해석을 이용하여 분석한 결과를 나타내었다.

2.1 형상 변경에 따른 금형수명 향상

Fig.3은 전절에서 언급한 베벨기어의 형상 변경에 따라 금형의 부가응력이 저감되는 것을 나타내고 있다.



(a) before modification



(b) after modification

Fig. 3 Applied stress of die for 1st stage of bevel gear before and after modification

형상 변화에 따라 치형성형 공정인 1공정의 금형 응력은 최대 주응력 기준으로 11,300MPa에서 6,650MPa로 감소하였으며 사이징 공정인 2공정의 응력은 9,160MPa에서 3130MPa로 감소하였다. 금형의 부가응력이 50% 수준으로 감소하고 있어 금형수명이 크게 향상되는 결과를 나타내었다.

2.2 금형공차 변경에 따른 수명 향상

금형에 가해지는 응력을 저감하는 방법은 경우에 따라 각각 다양한 방법이 존재할 수 있다. 그 가운데 한가지는 금형부품간의 공차가 있을 수 있다. Fig. 4는 Retainer Valve Spring이라는 부품을 사이징하는 펀치로서 그 공차가 10 μm 수준으로 매우 정밀하다. 따라서, 핵심 펀치와 케이스간 공차 또한 제품 정밀도에 영향을 미칠 수 있기 때문에 정밀한 가공이 필요하다. 그 공차는 기존에

50 m 이상이였으나 변경 후 10 m수준까지 감소시켰다. 그 결과 금형 수명은 50,000회에서 70,000회로 40%이상 향상되는 좋은 결과를 나타내었다. 그 원인 Fig. 5에서 알 수 있듯이 공차 변경에 따라 펀치에 가해지는 응력이 1,750MPa에서 1,270MPa로 30%이상 감소되었기 때문이다.

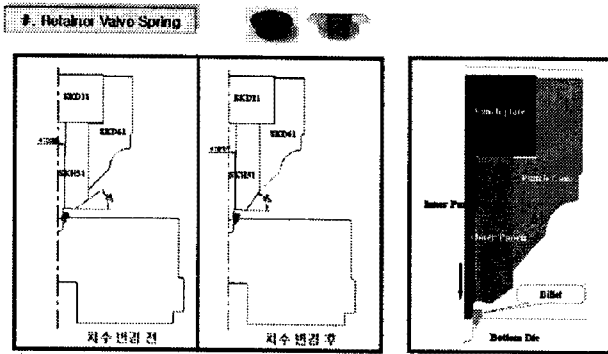


Fig. 4 Drawing of die for retainer valve spring

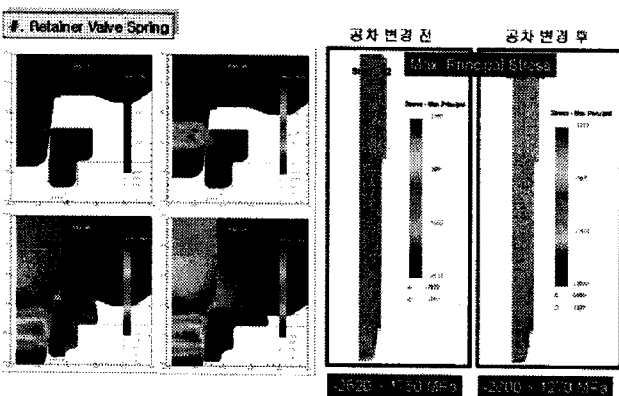


Fig. 5 Change of die stress according to the clearance between punch and case

금형 수명을 향상시킬 수 있는 방안은 이외에도 금형 소재를 고급소재로 변경하고 열처리 및 코팅 처리를 개선함으로써 그 수명을 향상시킬 수 있다.

3. 금형 열처리에 따른 영향

3.1. 초심냉처리에 의한 내마모성 향상

초 심냉 처리(Deep cryogenic treatment)란 공구강을 열처리함에 있어 오스테나이트화 후 템퍼링을 실시하기 전에 액체질소 온도 부근의 저온에서 일정 시간 유지한 후 템퍼링을 실시한 것으로, 이를 통해 공구강의 내마모성을 향상시킬 수 있다. 기존의 서브제로처리 또는 저온처리(-80℃ 이상)는 잔류오스테나이트의 마르텐사이트로의 상변태에 중점을 둔 반면 -196℃ 이하의 초 심냉 처리는 나노 단위의 미세 탄화물 석출에 의한 내마모성이 향상됨에 따라 공구수명이 최고 6배까지 향상시킬 수 있는 수준으로 이는 TiN코팅 이상의 효과에 해당된다.

본 연구에서는 냉간단조용 공구강으로 널리 사용되고 있는 KS-STD11 강종의 미세조직 및 내마모특성에 미치는 초 심냉 처리의 영향을 분석하였다. 열처리 조건은 1005℃에서 1.5시간 동안 가열하여 오스테나이트화 처리 후 공냉하였으며, 뜨임처리는 580℃에서 2시간 동안 가열 후 공냉하는 과정을 2회 반복하였다. 또한 초 심냉 처리는 오스테나이트화 처리 후, 뜨임 처리를 실시하기 전에 액체질소에 20시간 동안 침지하여 실시하였다.

Fig. 6은 오스테나이트 및 뜨임 처리만을 실시한 시편(Fig. 6-(a))과 초 심냉 처리를 추가로 실시한 시편(Fig. 6-(b))의 TEM 사진으로 탄화물의 크기 및 분포 등을 보여주고 있다. 뜨임 처리 온도를 변화시켜 미세조직을 관찰한 결과 뜨임 처리 온도가 증가할수록 탄화물량이 증가하고 조대화되었으며 초 심냉 처리를 실시한 경우, 탄화물이 상대적으로 미세화되고 그 수가 증가하였다. 이러한 경향은 Fig. 6에 잘 나타나있으며 이는 초 심냉 처리에 따라 탄화물의 핵생성 구동력이 변화되기 때문으로 판단된다.

그러나, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 1차 시제품에서는 하단부 플랜지에서 크랙이 발생하는 문제점을 나타내었다. 크랙 발생의 원인으로는 금형의 형상과 소재의 경도 및 구상화율, 또한 단조용 소재의 형상 및 크기에 문제의 원인이 있을 수 있기 때문에 우선 단조용 소재의 조직을 분석하였다. 분

석결과 경도는 HRB80수준을 유지하고 있고 구상화울 또한 90%수준을 나타내고 있어 소재의 전처리에 대한 문제점은 발견되지 않았다. 추가적으로 분석이 필요한 금형 형상과 단조 소재의 크기에 따른 영향은 유한요소해석을 통해 분석을 수행하였다.



(a)



(b)

Fig. 6 TEM micrographs of quenched and tempered specimen (a) and additional deep cryogenic treated specimen(b)

내마모성 비교를 위해 각각의 마모시편을 가공하여 입도 15 m의 다이아몬드 입자가 함유된 폴리머 패드를 상대재로 하여 10 분간 마모시험을 수행한 후 시편의 높이 감소를 측정하여 Fig. 7과 같이 초 심냉 처리를 한 경우가 내마모 특성이 20% 이상 향상됨을 알 수 있다. 초 심냉 처리

시편은 경도는 미소하게 감소하고 내 충격성은 증가하여 조직이 연화된 것으로 나타났으나 내마모특성은 오히려 향상되고 있다. 또한 잔류오스테나이트의 저감을 위해 행해지는 기존의 서브제로 처리와의 비교를 위해 -84℃에서 2 시간 동안 저온처리를 실시한 시편에 비해서도 내마모 특성이 우수한 결과를 나타내었다. 이와 같이 내마모 특성이 향상되는 이유는 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 미세한 탄화물이 형성되기 때문으로 판단된다.

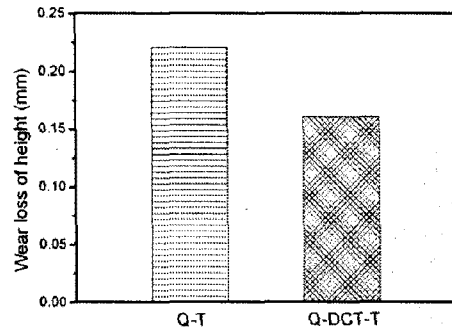


Fig. 7 Loss of height after wear test

또한, 대표적인 냉간단조용 금형강 중의 하나인 SKH51 또한 동일한 양상을 나타내었으며, 강도 분석을 위해 2 가지 소재에 대한 굽힘강도 시험을 수행하였다. 시험 소재는 상대 비교를 위해 일반 열처리된 소재와 함께 비교하였으며, 시험 결과는 Table 1 과 같이 2 가지 소재 모두 20%에 달하는 강도 향상 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 1 에서 알 수 있듯이 초심냉 처리는 금형의 강도를 향상시켜주고 있으므로 금형의 수명을 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있었으며 직선형 베벨기어 냉간단조용 금형에 적용함으로써 실 금형에서 수명을 확인하였다.

Table 1 Transverse rupture strength test results according to the heat treatment condition of tool for cold forging

| Material | Heat treatment | P (kg) | σ (MPa) |
|----------|----------------|--------|----------------|
| SKD11 | Q/T | 223 | 2,540 |
| | Cryogenic | 268 | 3,060 |
| SKH51 | Q/T | 380 | 4,290 |
| | Cryogenic | 451 | 5,010 |

3.2. 티타늄 나노열처리 의한 특성향상

티타늄 나노열처리는 극저온 처리와 함께 최근 특성 향상 효과에 대한 많은 우수한 결과들을 보여주고 있다. Fig. 8은 베벨기어 금형에 티타늄 나노 열처리 공정을 적용했을 경우 향상된 수명을 나타내고 있는데 열처리 공정을 적용하지 않았을 경우 10,000 회의 금형 수명이 열처리 공정을 적용할 경우 30,000 회까지 그 수명이 향상됨을 보여주고 있다. Ti 나노 열처리에 의해 금형 표면에 확산된 Ti 확산층은 XRD 분석에서 Intensity의 증가로 관찰되고 있다.

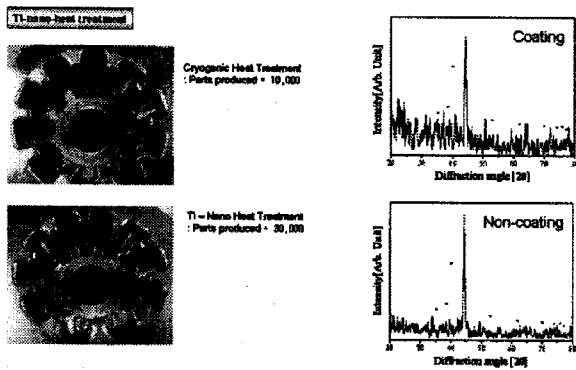
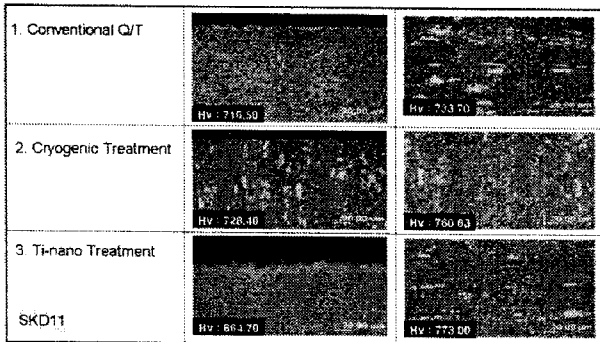


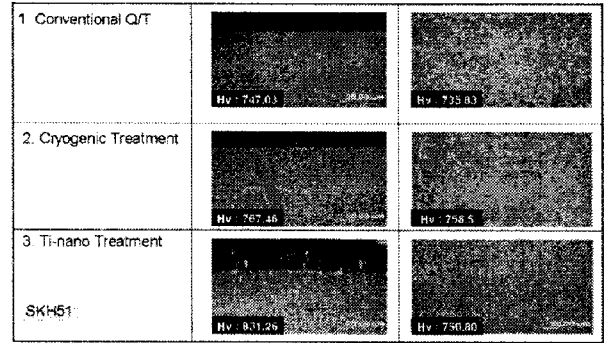
Fig. 8 Ti-nano heat treatment and XRD patterns

이와 같은 우수한 금형 특성 향상 효과는 티타늄 확산에 의해 표면 경도가 증가되기 때문에 내마모성이 향상되는 것으로 판단된다. Fig. 9는 SKD11 소재와 SKH51 소재의 열처리에 따른 조직 변화를 Fig. 10은 경도 변화를 나타내고 있다.

역시 조직의 변화는 관찰되지 않고 있으며 경도는 극저온 처리에 의해 증가된 경도 수준 보다 더 높은 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다.

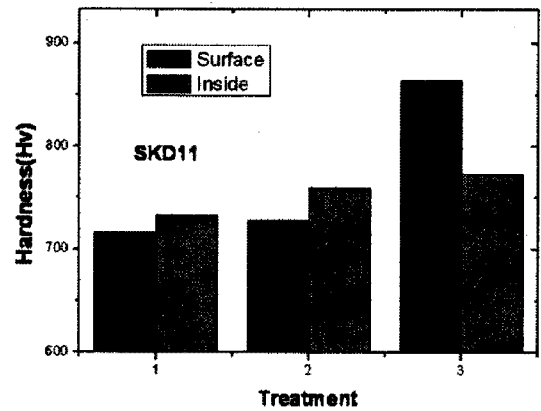


(a) SKD11

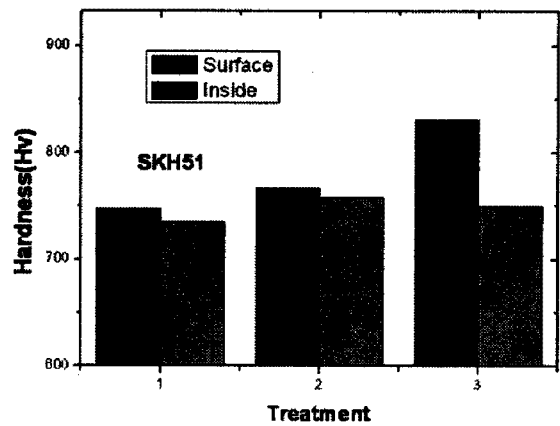


(b) SKH51

Fig. 9 Microstructure change of SKD11 and SKH51 according to the heat treatment



(a) SKD11



(b) SKH51

Fig. 10 Hardness change of SKD11 and SKH51 according to the heat treatment

4. 결 론

냉간단조용 금형 수명 및 공정 최적화를 통해 냉간단조품의 원가를 절감함으로써 궁극적으로는 생산성을 향상시키기 위해 수행한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 베벨기어의 제품 형상을 변경함으로써 금형에 가해지는 응력을 저감함으로써 금형 수명을 향상시킬 수 있었다. 제품 형상이 변경됨에 따라 발생될 수 있는 결함발생을 억제할 수 있는 방안을 유한요소해석을 이용하여 공정 최적화를 얻을 수 있었다.
- 2) 금형 공차를 적절히 조절함으로써 금형에 가해지는 응력을 저감할 수 있게 되고, 금형의 수명을 향상시킬 수 있었다.
- 3) 공구강의 열처리에 적용될 수 있는 초 심냉 처리는 미세한 탄화물의 형성을 유도하기 때문에 내마모성을 20%이상 향상시켜 주는 장점이 있음을 미세조직 사진과 마모시험을 통해 입증하였다.
- 4) 티타늄 나노열처리에 의해 증가된 표면 경도는 우수한 내마모 특성을 나타내었다.

이상의 결과를 냉간단조용 금형 수명 및 공정 최적화, 금형의 열처리와 코팅기술을 통한 금형수명 향상을 도모할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] 이영선 외, “냉간단조용 금형 수명에 미치는 공정변수의 영향”, 한국소성가공학회 2005 춘계 학술대회 논문집, pp215-218
- [2] Y.S.Lee, etc. “Effects of process variables affected in die life for cold forging”, Conference proceeding of 2005 KSTP spring annual meeting, pp215-218
- [3] Hyunkee Kim, Tetsuji Yagi, Masahito Yamanaka, “FE simulation as a must tool in cold/warm forging process and tool design, J. of Materials Processing Technology, 98 (2000) 143-149
- [4] Conor McCormack, John Managhan, “A finite element analysis of cold-forging dies using two- and three-dimensional models”, J. of Materials Processing Technology, 118 (2001) 286-292
- [5] Victor Vazquez, Daniel Hannan, Taylan Altan, “Tool life in cold forging-an example of design improvement to increase service life, J. of Materials Processing Technology, 98 (2000) 90-96
- [6] Paul C.Miller, 1980, “Deep cold solves heat-treat problems”, Tooling & Production, Vol.4, pp82-86
- [7] J.Y.Huang, Y.T.Zhu, X.Z.Liao, I.J.Beyerlein, M.A.Bourke, T.E.Mitchell, 2003, “Microstructure of cryogenic treated M2 tool