

철계 구동부품 온간 정밀단조기술

이영선¹ · 정기호² · 손동민³

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 실용화연구단
2. 한국생산기술연구원 성형기술그룹
3. 세아창원특수강 제품연구2그룹

Warm Precision Forging Technology of Ferrous Driven Part

Y. S. Lee, K. H. Jung, D. M. Son

1. Implementation Research Division, Korea Institute of Materials Science, R.O. Korea
2. Metal Forming Technology Group, R.O. Korea
3. R&D Center Product Research Group, SeAH CSS, R.O.Korea

1. 개 요

냉간과 열간의 중간온도(300 ~ 900℃)영역에서 가공하는 온간단조공정은 냉간단조와 열간단조의 단점을 극복할 수 있는 다양한 장점(에너지 경감, 인산염피막 불필요, 변형능 향상, 높은 치수정밀도 등)으로 인해 일부제품에는 오래전부터 사용되어 왔으나 냉/열간의 단점(낮은 금형수명, 고난이도 조직제어 등)을 극복하지 못하는 경우가 많아 많은 장점이 있음에도 불구하고 널리 이용되지는 못하고 있었다.

그러나, 정밀단조산업은 지속적인 경쟁력 유지를 위해 저원가와 고품질의 제조기술을 개발하고자 하고 있어 온간정밀단조기술 개발 요구가 증대되고 있는 실정이다. 정밀온간단조 기술은 표 1에 나타나 있는 바와 같이 기존 냉간단조, 열간+냉간사이징, 온간+냉간사이징 공정에 비해 공정수 절감으로 인한 저원가와 잔류응력 최소화로 인한 균일한 특성을 얻을 수 있어 향후 에너지산업의 세계시장 경쟁에서 주도권을 확보할 수 있는 핵심기술이다. 현재 국외는 미국(E사), 일본(M, N사), 독일(G사) 순으로 세계시장에서 우위를 점하고 있으나, 국내의 경우는 20여년 전부터 극히 일부 산업체에서만 제조설비

전체를 수입하여 생산하면서 금형수명 향상을 위한 연구를 수행한바 있다[1~4]. 그러나, 가공온도편차에 따른 조직제어문제와 상대적으로 낮은 금형수명 문제 해결에 필요한 국내 기반기술 부족으로 해외에서 턴키(Turn-Key)로 수입된 제조라인을 제외하고는 국내 자체적으로 온간단조 공정을 적용하여 생산성과 경제성을 합리화 하고자 한 노력은 매우 부족하였던 실정이다. 반면, 최근들어 더욱 치열해지고 있는 국제시장에서 경쟁력 확보를 위해 산업계의 시각변화에 따라 온간단조에 대한 관심이 급증하고 있다.

외국의 경우 또한 2000년부터 감소되던 온간단조에 대한 관심이 합금설계와 함께 단조와 열처리 공정을 연속적으로 제어함으로써 제품 특성 향상과 공정비용을 절감하고자 하는 노력이 진행되고 있다. [5-9] 결국, 온간단조 공정이 기존의 열간단조와 냉간단조 공정을 적극적으로 대체하게 될 것은 분명하며 핵심제조공정기술의 활용에 대한 욕구증가에 따라 스마트제조(smart manufacturing)기술의 실현에 추진력을 더하게 될 것이다.

온간단조 공정에서 가장 중요한 핵심기술은 대표적으로 2가지(조직제어, 금형수명)를 강조할 수 있다.

초창기에 온간단조 공정을 적용하고자 할 때 문제점으로 작용한 것 또한 동일한 2가지 문제(조직, 금형)이었지만, 현재는 과거와는 다른 수준에 놓여 있다.

첫째, 조직제어의 중요성은 온간단조 온도가 변태 온도 부근에 있다는 문제로 인해 발생된다. 일반적으로 정밀단조는 단조공정으로 이루어지기 때문에 단조품의 온도는 부위별로 서로 다른 분포를 나타내며 일부는 변태온도에서 극심한 소성변형을 겪게 됨으로써 조직 결함발생이 흔히 나타날 수 있다. 원소재 조직이 균일하지 못한 경우는 이러한 현상은 더욱 심하게 되어 해결 불가능 상태에 이르게 된다. 조직제어에 성공한다는 것은 조직특성을 안정화하고 더 나아가 향상을 통해 단조품의 특성을 향상시킬 수 있고 후열처리 공정을 제거할 수 있음으로써 제조공정비용의 절감효과를 얻을 수 있다.

둘째는 안정된 금형수명 확보가 매우 중요한 사항으로 조직제어 문제 보다 더욱더 많은 인자들이 서로 연결되어 영향을 미치는 만큼 근본적인 해결 방안을 마련하지 못하면 해결 불가능 상태가 된다. 금형수명은 단조공정 변수(온도, 윤활, 소재, 단조공정 등) 모두에 의해 영향을 받기 때문이다. 높은 온도에서 높은 단조압력을 받게 되는 것은 유사한 열간단조 공정보다 더욱더 금형수명 저하의 원인되는 핵심사항이다. 따라서, 온간단조 금형수명에 대해 소성변형량과 마모에 대한 연구를 해석적 방법을 통해 문제를 해결하고자 하였으며[5], 금형의 특성을 향상시켜 문제해결을 하고자 금형의 열처리(tempering)조건에 따른 특성향상을 도모한 바 있다[6].

최근에는 합금설계(microalloyed medium carbon steel)와 제어열처리를 통해 단조 후 열처리(quenching & tempering) 공정을 생략하고자 하는 노력이 보고되고 있다. 결정립미세화제를 첨가하고 온간단조 영역에서 가공열처리 후 냉각온도를 제어함으로써 단조품의 후열처리 없이도 그 특성을 확보하고자 하는 노력은 우수한 단조성과 가공성을 나타내고 있으나 충격인성에 아직은 개선이 필요한 상태이다[8]. 또한, 미세화제 가운데 Nb의 첨가여부에 따른 영향을 분석한 결과 Nb이 없을때는 연화(softening)현상 발생과 함께 기계적 성질 저하현상이 발생됨을 발생원인 분석(동적재결정 발생 유무)에 대한 결과 함께 보고된 바 있다[9].

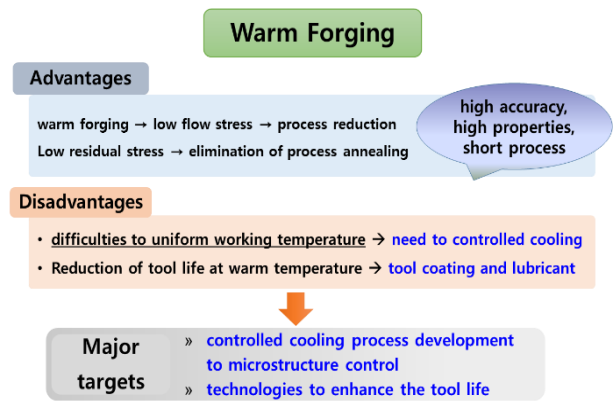


Fig. 1 Major topics for warm precision forging as well as benefits and disadvantages of warm forging

본고에서는 이러한 기술적 동향소개와 함께 관련 산업체에서 증가하고 있는 온간단조 공정 적용에 필요한 사항들을 개발 사례 중심으로 소개하고자 한다. 주로 자동차부품 가운데 철계 구동부품을 위주로 단조소재는 탄소강과 합금강에 대한 필요사항을 금형강에 대해서는 전통적으로 수입에 의존하고 있는 온간단조금형과 현재 국내에서 개발되어 활용이 시작된 국산 금형강에 대해 그 현황을 소개하고자 한다.

2. 온간단조품 조직제어

냉간과 열간의 중간온도(400 ~ 1,000℃)영역에서 가공하는 온간단조공정은 냉간단조와 열간단조의 단점을 극복할 수 있는 다양한 장점(에너지 경감, 인산염피막 불필요, 변형능 향상, 높은 형상 및 치수 정밀도)들이 있지만, 이는 열간단조와 냉간단조의 단점대비 장점들로서 역으로 열간과 냉간의 단점들만 발생하는 경우도 흔히 발생한다. 그러나, 최근 양산품의 고생산성이나 이용률의 향상 방안 뿐만 아니라, 다품종 소량생산품에 있어서도 정밀가공생략의 관점에서 온간단조가 더욱 더 주목을 받고 있다.

온간단조는 상온 성형에서 가공경화가 극심한 재료, 예를 들어 석출경화형의 스테인레스강, 중, 고탄소강, Cr함유량이 높은 SCM종, SCr종 등 성형한계를 개선하는 설계를 하지 않으면 안 되는 소재, 제품의 형상과 크기 때문에 열간단조의 선택이 일반적인 제품들에 모두 적용이 가능하다는 장점이 있다.

온간단조의 장점을 최대한 이용하기 위해 필요한 핵심기술로는 가공 시의 조직제어기술(온도조건 유지 및 제어냉각을 위한 공정기술)과 금형수명 향상 기술(금형소재, 윤활, 금형 냉각기술) 등이 중요한 기술항목에 해당된다. 이 가운데 조직제어를 위해서는 단조온도 선정과 제어냉각이 주요항목에 해당된다.

2.1 단조온도 선정

강의 온간단조에서는 소재의 가열 연화에 따라 가공 하중을 낮추기 위해서는 보통 400~800℃의 온도 범위를 지향하고 있지만 변형량이 큰 경우나 예비성형체 성형을 필요로 하는 경우는 900~1,000℃ 온도 범위에서 성형하기도 한다. 단조온도의 선정에서는 주로 재료, 성형 기계 및 장치, 금형 구성 등을 고려하여 적정 온도를 파악하고 온도 산포를 매우 엄격히 관리하는 것이 필요하다. 아래 Table 1에서는 최적가공 온도를 선정할 때 고려할 사항을 요인별로 정리한 것으로 온도에 따라 변화하는 특성을 고려하여 적정온도 선정 기준을 제시하고 있다.

Table 1 Factors to determine the optimum working temperature

Factor	Temperature dependency	Effects and necessary conditions
Flow Stress	Reduce the flow stress ; up to the 50%	Reduction of working pressure, load, energy ; small facilities
Formability	Formability enhancement ; increasing from 500℃	be able to deform low formability materials
Lubricant capability	Poor cooling capability	Need to better lubricant
Tool life	Poor strength and dimensional accuracy	Heat Crack, thermal stress deformation and wear of tool
Quality of forged part	Surface scale, grain growth and phase transformation	Better mechanical properties by fine grain size



Fig. 2 Transfer system for controlled cooling following forging press

2.2 미세조직 제어(냉각속도 제어)

온간단조 기술은 원소재 가열에 따른 재료의 미세조직 변화가 수반되므로 원하는 특성을 얻기 위해서는 미세조직 제어가 필요하다. 미세조직 제어 단조기술은 온간 단조 공정 후 냉각속도를 적절히 제어함으로써 단조품의 품질에 직접적인 영향을 미치는 미세조직(결정립도, 상)을 제어하는 기술로, 강도/경도/피로 등의 기계적 특성을 향상시키기 위하여 적용하는 기술이다. 또한 기계적 특성 제어 및 향상뿐만 아니라, 냉각속도 제어에 따른 미세조직 균질화는 품질 안정화 측면에서 요구되는 기술이다. 미세조직 제어를 위한 제어냉각 개념은 가속냉각공정이 접목된 열가공제어공정(Thermo-Mechanical Controlled Process, TMCP) 기술에 적용되었다. 미세조직 제어를 통한 초고강도의 기계적 특성을 갖는 부품을 단조하기 위해 제어냉각 기술을 접목한 단조 기술인 오스포밍(Ausforming)이[10,11] 미국에서 개발되었으며, 이 기술은 단조와 냉각속도 제어를 통해 미세조직을 제어함으로써 원하고자 하는 임계성능을 향상시키는 기술이다.

미세조직 제어를 통한 내충격성, 내피로성, 강도 등 기계적 특성을 향상시키기 위해 소성변형의 변형기구 정밀 분석 기술을 적용하여 미세조직의 이론적 체계를 확립하고 미세조직을 예측하여, 이를 온간단조 기술과 연계함으로써 부품의 저원가화 및 고품질화를 동시에 달성할 수 있다. 미세조직 제어 정밀단조기술은 국내단조 업체들이 등한시 해왔던 재료와 소성가공기술이 접목된 기술로서 국내 단조 업체들이 첨단단조기술을 확보하고 공유할 수 있는 중요한 기술이다.

결정립 변화를 예측할 수 있는 수치적 모델은 개

발되어 있으며, 이를 적용한 수치해석 기술이 보급되고 있어 단조공정 중의 미세조직 변화를 정량적으로 예측할 수 있다. 하지만, 국내단조업체의 활용을 위해서는 소재와 부품에 따른 해석기술의 최적화 과정, 전문인력, 단조 이론에 대한 숙지 등이 필요한 실정이다.

3. 온간단조용 금형수명

3.1 금형 비중

전술한 바와 같이 많은 장점을 가진 온간단조 역시 실용화 초기에는 금형수명이 상당히 짧고 금형운환, 금형냉각, 금형재료 및 열처리 조건 등 해결해야 할 많은 문제들이 있었으며, 현재에도 금형수명은 양산화 과정 중에 특히 주의해야 될 공정변수이다. Fig. 3은 베어링 레이스의 각종 단조법에서의 원가를 비교한 것으로 냉간단조에 비해 금형비의 비율이 상대적으로 증가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3에서 온간단조품의 원가는 열간단조품에 비해 설비비, 금형비, 재료비의 측면에서 큰 폭의 절감이 이루어진 것을 알 수 있다. 그러나 냉간단조품과 비교할 경우 소둔, 윤활피막처리에 상당하는 비용이 대폭적으로 절감되었지만, 금형비는 증가되고 있다. 베어링 레이스와 유사하게, 제품형상이 더욱 복잡한 전륜구동차용 등속조인트 외륜의 원가 비교에서도 Table 2와 같이 금형비의 비율이 증가되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 온간단조는 냉간단조에 비해서 금형수명이 짧고 금형원가는 높아지지만 종합원가를 고려할 경우 냉간단조와 열간단조에 비해 여전히 장점이 있는 가공법이다.

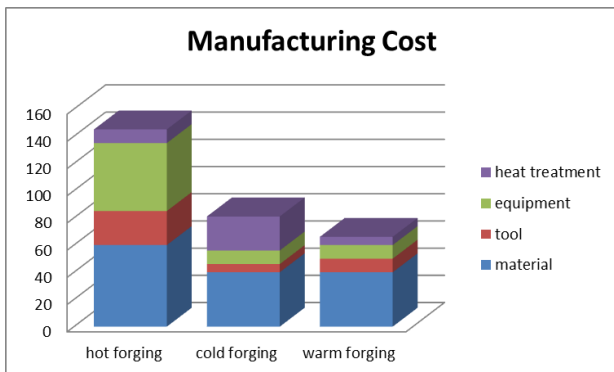


Fig. 3 Comparisons of manufacturing cost at each forging process(ex.; bearing race)

Table 2 Comparisons of manufacturing cost at each forging process

	Hot Forging	Cold Forging	Warm Forging
Facilities	53.6(10.4%)	51.2 (8.7%)	43.9 (12.2%)
Material	313.6 (60.9%)	286.0 (48.5%)	195.8 (54.5%)
Tool	120.0 (23.3%)	38.6 (6.6%)	70.2 (19.6%)
Electric	17.8 (3.5%)	3.8 (0.1%)	11.3 (3.2%)
Heat treatment	-	99.0 (16.9%)	-
Lubricant	0.6 (0.1%)	99.0 (16.9%)	33.0 (9.2%)
Laber	9.0 (1.8%)	12.5 (2.2%)	4.8 (1.3%)
Cost	514.6 + M/C	590.1	359.0
Relative Cost	1.43 + α	1.64	1.0

3.2 금형소재

온간단조에는 피 가공재의 변형저항이 냉간단조에 비해 낮지만 가공 시의 온도가 높기 때문에 냉간단조보다 가혹한 조건에서 금형이 사용되게 되며, 온간단조의 큰 장점 중 하나인 냉간단조품의 치수정도와 동일한 품질을 생산하기 위해서는 금형의 내구성이 중요한 문제로 대두된다. 온간단조의 변형저항은 냉간단조에 비해서 상당히 낮지만(40 ~ 50%) 열간단조에 비하면 높고, 열영향을 많이 받는다. 따라서 온간단조를 성공시키기 위해서는 어떻게 금형 재료를 적절히 선정하는가가 중요하다. 금형 재료의 선정은 단조온도, 가공면압, 단조품의 형상, 목표로 하는 제품 공차, 생산량, 종합원가 등을 고려해서 결정해야만 한다. 일반적으로 자주 사용되는 온간단조용 금형재료의 기계적 성질은 Fig. 4와 같다. STD61종 소재는 열충격, 열피로에 대해 상당히 좋고, 또 가격도 저렴하지만 경도가 낮기 때문에 내마모성, 고온강도(국부 변형을 일으키기 쉬움)가 상대적으로 떨어진다. 따라서 열 영향을 많이 받으므로 공구 면압이 낮은 부분에 사용하면 효과적이다. 이와는 반대로 SKH51은 STD61과는 반대로 열영향은

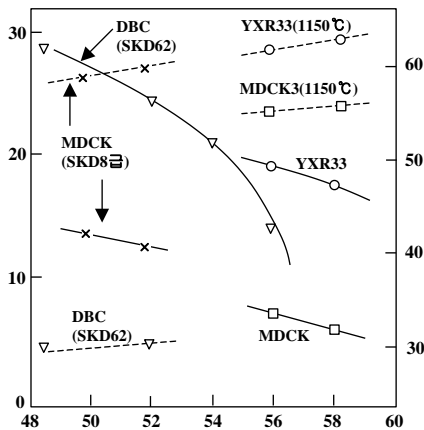


Fig. 4 Mechanical properties of many kinds of tool steels

작지만 변형저항이 높은 부분과 마모되기 쉬운 부분에 사용된다. 그러나 열 균열 발생이 쉬워 안정성이 부족하다. 또한, STD61과 유사하지만 고온경도가 높은 MDCK소재는 열 영향을 많이 받고, 비교적 가공면압이 높은 부분에 사용된다. 이와 함께 상온에서 온간에 걸쳐 내압강도가 크고 열간강도, 연화저항이 크며 내열마찰성이 좋은 매트릭스 하이스계 금형재로서 일체 YXR3은 최소 10,000개 이상의 금형수명을 나타내고 있다. YXR3의 사용실적의 경우 온간단조 뿐만 아니라, 정밀열간단조 분야에서도 좋은 결과를 거두고 있다. 정밀 냉.온간단조 전용 금형재로서 개발된 YXR3은 HRC56 ~ 58에서 사용함으로써 상온에서부터 온간, 열간에 걸쳐서 경도를 높게 유지할 수 있는데다 700°C 등 고온역의 강도는 SKD8과 동등이상이고 종래의 고속도강, 열간공구강 중에서는 가장 높다. 일체 YXR3의 국산 대체소재인 KCW1은 냉/열간 금형용 공구강(STD11, STD61)과 고합금 고속도강(SKH51)의 단점을 개량하여 개발되었으며, 기존 냉/열간 금형 소재에 대비 고경도 확보 및 충격인성이 향상된 특성을 보이고 있다.

4. 적용 사례

4.1 조직 제어

조직제어는 온간단조 후 제어냉각을 통해 추가 열처리를 수행하지 않고도 균일한 조직과 특성을 얻고자 하는 것으로 크게 2가지로 진행되고 있다. 첫째는 (1)기준에 냉간단조로 제조되고 있는 것을



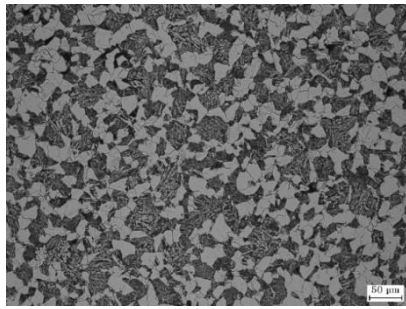
Fig. 5 Straight bevel gear fabricated by warm forging(as-final machined)

온간단조로 전환하는데 필요한 기술을 개발하는 것으로 직선형 베벨기어가 그 대상이다. 둘째는 (2) 열간단조로 제조되고 있는 기존 제조공정을 온간단조로 전환하는 것이다.

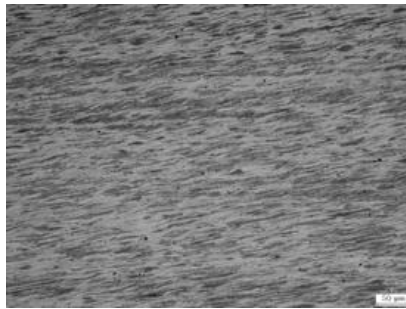
4.1.1 직선형 베벨기어

첫째, 자동차 차동장치용 베벨기어는 요구 치수정밀도가 높기 때문에 냉간단조공정을 이용하거나, 열간단조 후 냉간사이징(sizing) 공정을 거치는 공정이 일반적이다. 그러나, 냉간단조로 제조하는 경우는 내부 잔류응력이 과도하여 과도한 잔류응력으로 인해 열처리 후 조직불균일 등 결함이 발생하는 경우가 있기 때문에 선진국에서는 냉간단조 후 조직균일화를 위한 후열처리 공정을 필수적으로 사용하거나, 온간단조 공정을 이용하여 조직을 제어하고 있다.

온간단조로 제조된 직선형 베벨기어의 기계가공 후 외관은 Fig. 5에 나타나 있으며 결함없이 건전한 표면 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. 온간단조 후 미세조직은 Fig. 6(b)에 나타나 있는데 사용된 원소재(SCM420H)의 페라이트+펄라이트 조직이 단조로 인해 압착된 조직을 나타내고 있다. 변형율과 단조온도는 단조품의 미세조직에 많은 영향을 미침으로 상용해석 프로그램인 ForgeNX™을 이용하여 단조공정과 단조 후 미세조직을 예측하였다. 온간단조 효과를 제시하기 위해 열간단조(단조온도 1,100°C)와 온간단조(단조온도 800°C)의 경우를 상대 비교하였다. Fig. 7은 열간과 온간단조의 경우 변형율과 온도 분포와 함께 결정립크기를 비교하였다. 해석에 사용된 초기 결정립크기는 약 14 μ m(ASTM 9.4)으로서 온간단조품의 경우는 최소 1.11 μ m까지 감소되는 경향을 나타내고 있는 반면 열간단조품의 경우는 결정립 감소와 성장이 함께 발생되어 4.51~93.39 μ m까지 매우 불균일한 분포를 나타내고 있다.



(a) as-received



(b) as-forged

Fig. 6 Microstructures of warm forged bevel gear

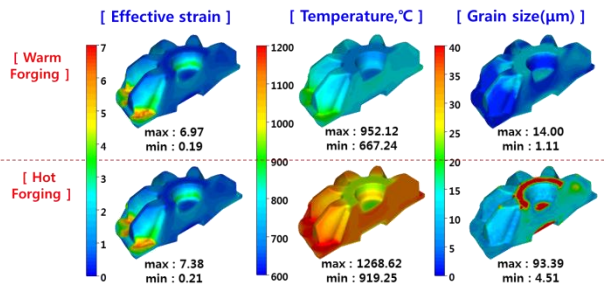


Fig. 7 Grain size of warm forged bevel gear predicted by FEM Analysis

해석에 사용된 소재 압축 변형저항은 글리블(Gleeble)시험기를 이용하여 5개 온도조건(700℃, 800℃, 900℃, 1,000℃, 1,100℃)에서 5가지 변형율속도 조건(10/s, 1/s, 0.1/s, 0.01/s, 0.001/s)에서 측정 후 데이터 분석 후 Hansel Spittel식으로 변환하여 사용하였으며 마찰계수는 전단마찰상수 0.15값을 이용하였다.

4.1.2 풀리(pulley)

두번째, 자동차 부품으로 풀리(pulley)는 열간단조로 제조되고 있는 부품으로 원소재는 고탄소강

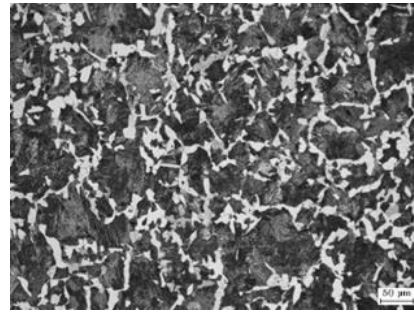
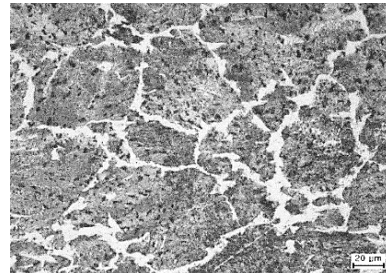
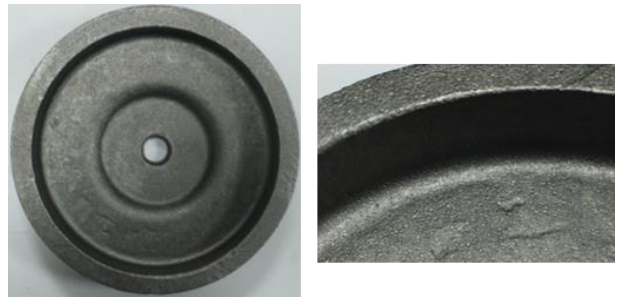
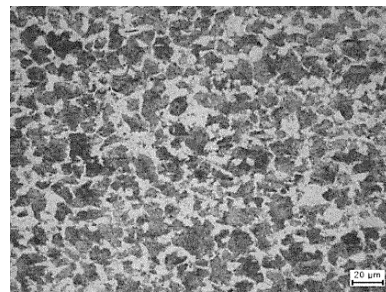


Fig. 8 Microstructures of raw material for pulley(S45C)



(a) hot forging



(b) warm forging

Fig. 9 Hot forged part and warm forged part of pulley

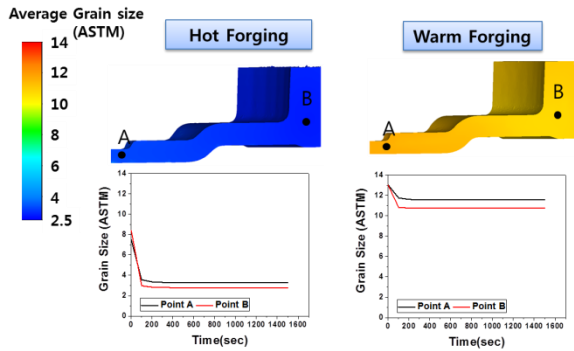


Fig.10 Grain size of pulley predicted by FEM Analysis

(S45C)이 활용되고 있어 불균일 조직분포와 낮은 금형수명 등의 문제점을 해결하고자 온간단조 공정을 개발하였다. Fig. 8은 S45C의 원소재 조직(페라이트 + 펄라이트 혼합조직)을 나타내고 있으며 평균 결정립 크기는 28 μ m(ASTM 7.3)수준을 나타내고 있다.

기존 열간단조품은 단조온도 1,200 $^{\circ}$ C에서 2공정(Blocker + Finisher)에 통해 제조되며 Fig. 9(a) 같은 형상으로 일부 표면결함과 조대화된 결정립(100 μ m)을 나타내는 반면, 온간단조품은 동일한 2공정을 거쳐 결함없는 외관을 얻을 수 있으며 Fig. 9(b)와 같이 아주 미세화된 결정립(10 μ m)을 나타내고 있다. 이러한 결과는 동일한 방법으로 수행한 유한요소해석 결과에서도 확인할 수 있다(Fig.10).

4.2 금형 수명

금형수명은 현재 온간단조 전용라인에서 생산되고 있는 단조품(tripod housing) 제조에 사용되고 있는 금형(외산)을 국산소재로 대체하면서 금형수명을 순차적으로 향상시킬 수 있도록 추진하였다. 온간단조용 금형으로 일반적으로 사용되고 있는 소재는 YRX-3(일본산)소재로서 원소재가 고가임에도 불구하고 대체 소재가 국내에서 생산되고 있지 않아 외산소재에 의존하고 있었다.

온간단조용 소재는 Fig.11에 나타나 있는 바와 같이, 열간단조용 금형소재의 인성과 냉간단조용 금형강의 강도 특성을 요구하고 있는 특징을 갖고 있다. 금형강은 템퍼링 조건에 따라 특성(경도, 인성 등)이 변화되고 직접적으로는 경도값에 영향을 주게된다. Fig. 12는 경도분포에 따른 인성을 나타내고 있는데 외산소재와 KCW1(국산) 모두 일정 경도범위내(HRC 55~60)에서 더욱 더 좋은 값을 나타내고 있다.

결국, 적정 경도분포를 갖도록 템퍼링 온도를 조절

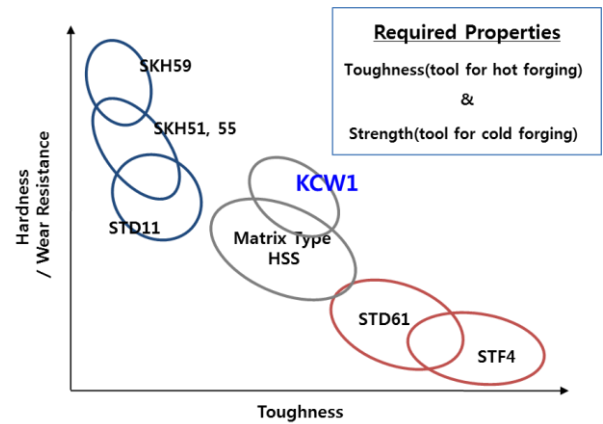


Fig.11 Required properties for warm forging tool

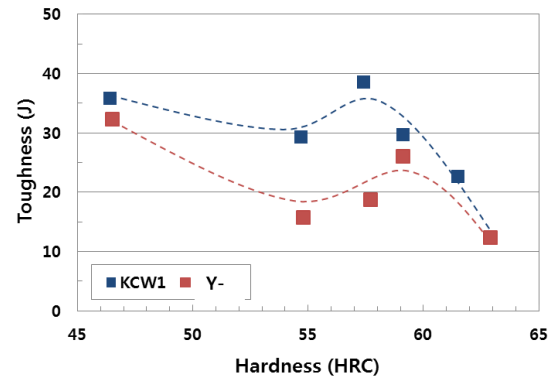


Fig.12 Toughness according to the hardness



Fig.13 Tool wear of punch for tripod-housing

하여 연구개발 대상인 트라이파트(tripod) 하우징(housing)용 4공정 펀치를 제작하였다. 대상 단조품을 제조하는데 있어 적정 경도분포(HRC 54~56)를 갖도록 제작된 금형은 외산 소재와 동등이상(18,000타 이상)보다 우수한 마모특성을 나타내어 추가적인 수명 향상을 기대하고 있다. Fig. 13은 시험종류 후 마모된 부위의 금형사진을 나타내고 있으며 마모량은



Fig.14 Tool wear of punch for BJ-housing

약 0.28mm로 분석되었다.

추가적으로 진행된 Ball Joint Type Housing용 단조금형에서도 비교 대상 금형소재에 비해 10% 이상 수명 향상 효과를 확인할 수 있었다. Fig. 14는 볼조인트 타입 하우스용 후방압출펀치의 외관과 실험 후 펀치 외관을 나타내고 있다.

5. 결론

글로벌 경쟁시대의 시작과 함께 대량생산에 따른 원가절감은 물론 제품 품질 향상을 통한 고객 만족도 향상은 부품산업은 물론 조립(완제품)산업 경쟁력의 근간이 되는 만큼 혁신적인 공정기술 확보를 통한 국제 경쟁력 확보는 이제 필수사항이다.

열간단조로 시작되어 냉간단조 공정을 통해 보다 성숙된 자동차 구동부품용 정밀단조기술은 기존 공정(열간, 냉간)보다 가격과 품질 모두를 고도화시킬 수 있는 공정을 요구하고 있고 온간단조의 적용이 활발해지는 요인으로 작용하고 있다.

이에 본고에서는 온간단조의 기본사항에 대한 점검과 주요핵심기술(조직제어, 금형수명)에 대한 개발 사례를 통해 온간단조기술을 활용하고자 할 때 고려해야 하는 인자들과 추진전략에 대해 소개하고자 하였다. 또한 국내의 기반기술이 성숙되면서 단조회사는 물론 소재회사의 적극적인 협조로 인해 전반적인 기반기술의 향상이 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서, 단조회사들의 높아지는 온간단조 적용의지는 소재회사들의 동기부여로 자동적으로 연결되어 향후 온간단조산업 육성에 활력이 될 것이다.

(주)산업기술혁신사업(10063298)으로 진행되고 있는 “철계구동부품 정밀온간단조기술개발” 과제의 결과물이며 관계자 여러분께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- [1] J. H. Kang, S. S. Kang, 2001, Die Life on Warm Forging, Proceeding of Korean Forging Symposium, pp. 326~339.
- [2] J. H. Kang, B. H. Ko, J. S. Jae, S. S. Kang, 2005, Lubrication and Cooling Characteristics of Warm Forging Lubricants, Trans. Mater. Process., Vol.14, No. 7, pp. 619~623.
- [3] J. H. Kang, B. H. Ko, J. S. Jae, S. S. Kang, 2006, Contact Heat Transfer Coefficient for Finite Element Analysis in Warm Forging Processes, Trans. Mater. Process., Vol.15, No.3, pp. 183~188.
- [4] D. J. Jeong, D. J. Kim, B. M. Kim, 2001, Evaluation of Friction Shear Factor by the Lubricating Methods in Warm Forging, Trans. Mater. Process., Vol.10, No. 4, pp. 319~328.
- [5] A. K. Padap, G. P. Chaudhari, V. Pancholi, S. K. Nath, 2010, Warm Multiaxial Forging of AISI1060, Mater. Des., Vol. 31, pp. 3816~3824.
- [6] P. R. Spenda, D. Firrao, 2013, Thermomechanical Warm Forging of Ti-V, Ti-Nb, and Ti-B Microalloyed Medium Carbon Steels, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 560, pp. 208~215.
- [7] P. Springer, U. Prael, 2016, Characterisation of Mechanical Behavior of 18CrNiMo7-6 Steel with and without nb under Warm Forging Conditions through Processing Maps Analysis, J. Mater. Process. Technol., Vol. 237, pp. 216~234.
- [8] C. Choi, A. Groseclose, T. Altan, 2012, Estimation of Plastic Deformation and Abrasive Wear in Warm Forging Dies, J. Mater. Process. Technol., Vol. 212, No. 8, pp. 1742~1752.
- [9] E. Virtanen, C. J. Van Tyne, B. S. Levy, G. Brada, 2013, The Tempering Parameter for Evaluating Softening of Hot and Warm Forging Die Steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 213, No. 8, pp. 1364~1369.
- [10] M. Kabirmohammadi, B. Avishan, S. Yazdani, 2016, Transformation Kinetics and Microstructural Features in Low-Temperature Bainite After Ausforming Process, Mater. Chem. Phys., Vol. 184, No. 1, pp. 306~317.

- [11] H. Hu, H. S. Zurob, G. Xu, D. Embury, G. R. Purdy, 2015, New Insights to the Effects of Ausforming on the Bainitic Transformation, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 626, pp. 34~40.