

차량용 Wheel Nut 소재의 보론강적용을 위한 단조공정에 관한 연구 Study of a Forging Process for the Application of Boron Steel for Automotive Wheel Nut Material

이권수* · 안용식**

Kwon-Soo Lee* and Yong-Sik Ahn**

(Received 28 December 2016, Revision received 25 February 2017, Accepted 27 February 2017)

Abstract: Boron steel (51B20) was cold forged using by new designed dies to apply for automotive aluminum wheel nut. The formability and mechanical properties of boron steel were compared with carbon steel(S45C) which has been used up to date for the wheel nut material. The formability was investigated on the dies designed with various types of punch nose using by FEM. The metal flow and compressive stress on the dies during cold forging were investigated and compared each other. The forging process with a new designed die showed the improved metal flow with a reduced forging load which resulted in the significant increase of the die life. It was recommended that the carbon steel for automotive wheel nut material could be substituted by the boron steel.

Key Words : Cold forging, Die design, Boron steel, Tooling life

1. 서 론

냉간성형은 재결정 온도 이하에서 스크랩을 최소화하여 금속의 모양을 원하는 형상으로 변형시키는 가공법으로서 생산비용의 절감, 생산율 향상, 기계적 성질개선, 정밀한 치수정도, 환경오염 감소, 에너지 절약 등의 이점으로 산업계에서 많이 적용되어 왔으며 최근에 금형과 치공구 설계의 기술수준 향상과 금형재료의 개발 및 개선으로 한층 보편화되어 기계가공 및 열간단조로 생산되어 왔던 제품들이 많은 부분 냉간단조로 대체되어 왔다. 하지만 오늘날 냉간단조산업계는 원자재 가격 상승과 더불어 단조품 가격하락으로

인해 지속적으로 경제성이 떨어지고 있는 추세이다. 냉간단조품인 알루미늄 휠 너트는 대형트럭 전 차종의 휠에 장착되는 너트로 크기가 대형이므로 저렴한 원소재 비용과 적절한 금형수명이 필수적이다. 이 제품의 생산 시에는 많은 공정수에 따른 생산성 저하와 이에 따른 과도한 스크랩이 발생하는 문제점이 존재하고 있으며, 또한 사용소재인 탄소강(S45C)의 가격도 지속적으로 증가함으로써 제품 경쟁력이 꾸준히 하락하고 있는 실정이다. 냉간단조에서는 예비성형 단계의 최적 설계가 중요하며, 이에 상응하는 금형과 치공구가 필요하다. 특히 냉간단조용 금형은 대단히 큰 응력하의 가혹한 작업조건에서 사용되므로 파손의

*† 안용식(교신저자) : 부경대학교 재료공학과
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6361
*이권수 : 부경대학교 재료공학과

**† Yong-Sik Ahn(corresponding author) : Department of Materials Sci. & Eng. Pukyong National University.
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6361

*Kwon-Soo Lee : Department of Materials Sci. & Eng. Pukyong National University.

위험이 많다. 따라서 원소재, 금형설계, 열처리, 적용장비, 기타 제조공정 등 다양한 요인들의 영향을 종합적으로 검토하여야 한다. 이 중에서도 최적의 공정설계(성형방법 및 성형공정수의 선택)에 의한 금형설계 및 원소재의 선택이 특히 중요하다. Wheel nut 제품은 현재까지 탄소강(S45C)을 냉간단조하여 제조하고 있는데, 냉간단조전 압연재의 소성가공성을 높이기 위한 구상화 열처리 및 너트 성형의 강도제어를 위한 조질 열처리를 실시한다.

보론강은 탄소강에 비해 인성을 개선하고 제어 압연을 통하여 조직을 보다 미세화시켜 신선상태에서 우수한 강도와 인성을 나타내는 강종으로 알려져 있다. 특히 보론강은 탄소강에 비해 가격이 저렴하므로 생산비의 절감이 기대되고 있다. 보론강에 있어서 보론원소는 미소량의 첨가로 강의 경화능을 향상시키는 역할을 한다. Cr, Mo 등의 합금원소도 역시 첨가량이 증가함에 따라 경화능이 증가하나, Boron은 아주 미량(0.0005~0.003 wt%)을 첨가해도 경화능이 탁월하게 상승된다.¹⁾ 또한 단조공정에서 중요하게 요구되는 특성은 단조금형의 수명이다. 단조금형의 수명은 주로 국부적인 응력집중, 소성변형, 마모 등에 큰 영향을 받는다. 금형수명저하 현상들은 단조 공정 설계 및 금형역학과 불가분의 관계를 맺고 있다. 금형역학은 금형과 소재의 복잡한 접촉문제와 함께 응력, 탄성 및 소성변형문제를 포함한다. 금형의 구조해석 기술인 유한요소법에 기초하여 금형의 구조해석을 시도한 대표적인 연구자들은 Engel과 Hänse²⁾, Xing-Hua³⁾, Hawkyard⁴⁾ 등이 있으며, 단조나 압출금형의 탄성역학에 관해서는 Hoffmann 등⁵⁾과 Brebbia⁶⁾, Wadabayashi⁷⁾ 및 Fu 등⁸⁾에 의해 연구되었다. 단조조건에 의한 강의 미세조직 및 기계적성질에 대해서는 Lee 등⁹⁾ 기존 연구자들에 의해 다수 보고되어 있다.

본 연구에서는 단조재로 보론강(51B20)의 단조성을 탄소강(S45C)과 비교하고 금형의 수명에 미치는 영향을 분석함으로써 너트 소재로서 보론강의 적용가능성을 조사하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 재료와 시험방법

Table 1에서는 본 연구에서 사용된 냉간단조용 탄소강과 보론강 화학성분을 나타낸다. 표에서 보면, 보론강의 경우 탄소강(0.44%)에 비해 탄소함량이 0.19%로 적으며 탄소강에 첨가되지 않았던 Cr 및 B 원소가 각각 0.76 및 0.002% 첨가되어 있으며, 그 외의 성분은 미량으로 함유되어 있어서 서로 뚜렷한 차이가 없다. 연구에 사용된 소재는 직경이 $\varnothing 30$ mm인 냉간압연된 선재이다.

Table 1 Chemical composition of S45C and 51B20 steels (wt.%)

	C	Si	Mn	P	Cr	B
S45C	0.44	0.17	0.013	0.013	-	-
51B20	0.19	0.25	0.016	0.016	0.76	0.002

본 연구에서는 냉간단조 공정별 금형내부의 응력변화를 평가하기 위해 유한 요소해석 프로그램인 Deform 3D를 이용한 성형해석을 실시하였다. 유한요소 해석을 통한 압출 펀치코 형상에 따른 공정별 하중 분배를 비교하여 각 공정 단계에서 발생할 수 있는 문제점을 분석하였으며, 이를 실제 공정에 적용하여 분석하였다.

Table 2는 시험에 사용한 cold former와 press의 제원을 나타낸다. IS-8形 Model은 one dies, 1st & 2nd Punch로 구성되었으며, Long bolt류 제품을 성형하는데 최적화된 장치이다. HBF-428L Model은 4단 공정으로 구성되었으며, 절삭가공제품을 정밀 단조공법으로 적용시켜 복잡한 형상을 가진 제품의 성형을 위해 최적화된 기종이다.

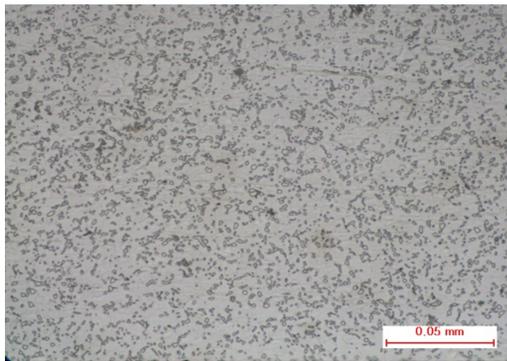
냉간단조는 상온에서 수행되었으며, forming load는 4 공정 Total 350 Ton, 가공속도는 500 mm/sec이었다. 인장시험은 100톤 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하였으며, 이때 Cross head 속도는 일정하게 100 mm/sec로 하였다. 소재는 단조 전 740℃에서 30 hr 동안 구상화열처리되었으며, 미세조직관찰을 위해 경면연마 후 Nital 에칭이 행해졌다.

Table 2 Current of the process specifications for cold former and press

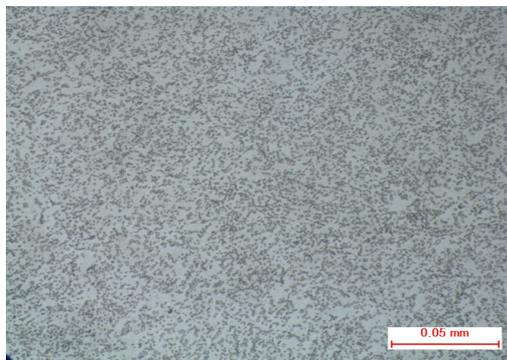
MODEL	IS - 8 形	HBF-428L
Forming stations	2	4
Cut-off length (max. mm)	300	330
Cut-off dia (max.mm)	∅32	∅30
K.O (max.mm)	250	260
Die dia (mm)	∅150	∅150
Forging load (Ton)	450	450
Main motor (kw)	120	132
Production (parts/min)	60	80

3. 결과 및 고찰

3.1 소재의 미세조직과 기계적 특성



(a)



(b)

Fig. 1 Spheroidized microstructure of (a) carbon steel and (b) boron steel

Fig. 1에서는 탄소강과 보론강의 구상화 조직을 비교하여 나타낸다. 그림에서 보면 두 강종 모두 충분히 구상화가 발생한 것을 알 수 있다. 구상화된 탄화물의 입자크기는 보론강이 탄소강에 비해 상대적으로 미세하고 입자의 개수도 많은 것으로 보인다. Table 1에서 나타낸 바와 같이 실제 두 소재의 탄소함유량을 비교하면 탄소강의 경우 (0.44%C)가 보론강(0.19%C)에 비해 높아 탄화물의 체적비율은 높을 것으로 예상되었으나, Image analyser에 의한 정량분석 결과 보론강의 구상화율이 90%로 탄소강의 80%보다 더 높았다. 이것은 보론강에 침입원소로 첨가되어 있는 boron이 핵생성을 촉진시킴으로써 미세탄화물을 더 많이 생성시켰기 때문이라고 알려져 있다.¹⁰⁾

Fig. 2는 탄소강과 보론강에 대한 인장시험결과이다. 응력-변형률 곡선에서 보면 두 소재는 응력 유동곡선이 유사한 양상을 나타내고 있으며, 동일 조건에서 두 번씩 시험되어 측정된 평균값이 Table 3에 나타나 있다.

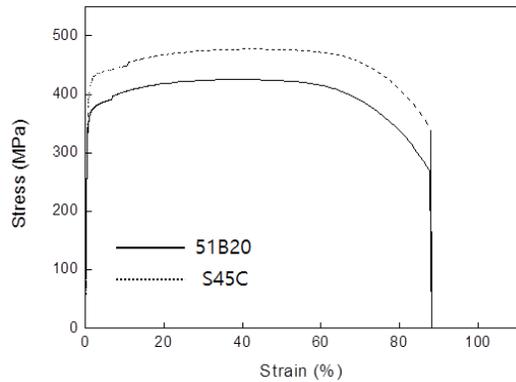


Fig. 2 Stress and strain curve of Boron steel (51B20) & carbon steel (S45C)

Table 3에서 보면 보론강이 탄소강에 비해 인장강도(TS)와 항복강도(YS)가 약 50 MPa 정도 더 낮고, 연신율(EI)은 3.5%, 단면감소율(RA)은 8.5% 더 높게 나타났다. 즉 인장시험에 의한 위의 결과를 보면 보론강이 탄소강에 비해 단조가공성이 우수할 것으로 예상된다.

Table 3 Tensile properties of 2 samples

Steels	TS(MPa)	YS(MPa)	El(%)	RA(%)
S45C	487	405	33	64
51B20	434	359	38	73

Fig. 3은 평와셔의 최종도면과 단조 및 기계가공이 끝난 최종제품을 나타내고 있다. 와셔 최종제품은 총높이 8 mm, 몸통부 지름 $\phi=43$ mm이다.

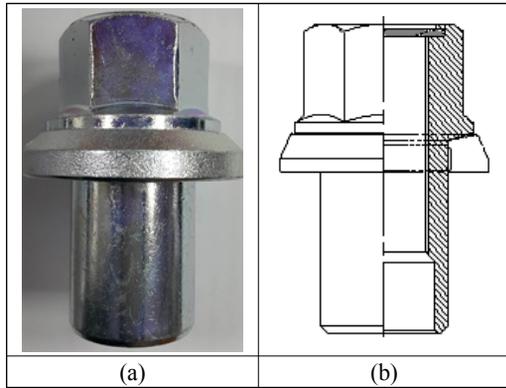


Fig. 3 A finished product (a) and 2D-modeling (b) of Al wheel nut

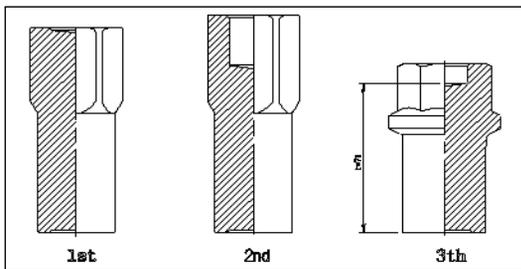


Fig. 4 Current sequence of forging process for Al wheel nut

Fig. 4는 기존 단조공정을 나타내고 있으며 3단계로 이루어져 있다. 1st 공정품은 몸통부 후방 압출공법을 적용하지 못하여 최종 2nd 공정품 catch up 두께 $t=71$ mm(중량:486g)로 과도하게 발생하였고, 이로 인해 3rd 성형 후 드릴가공에 따른 생산시간이 지연되고, 기계가공에 따른 소재의 손실도

발생하였다. 실제 이 형태로 공정설계된 다이를 가지고 후방압출을 실제 적용한 결과, 소재의 성형도 잘 이루어지지 않았으며 수차례의 단조작업 후 압출핀의 파손이 발생하였다. 후방압출공정을 사용하기 위해서는 가공성이 우수한 소재를 사용하거나 또는 공정설계를 대폭 개선시키는 방법이 고려된다.

이에 대한 방편으로 본 연구에서는 가격 경쟁력이 우수한 보론강(51B20)을 선정하였고 공정설계를 Fig. 5와 같이 변경하였다.

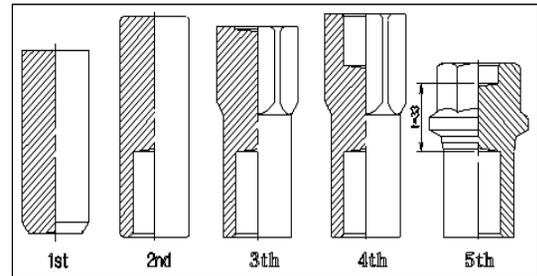


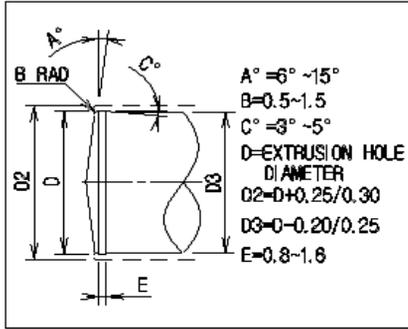
Fig. 5 Improvement sequence forging process for Al wheel nut

Fig. 5에서는 1st, 2nd 공정을 추가하고, 또한 몸통부 후방압출공법을 적용하여 최종 5th 공정품에서는 catch up 두께 $t=33$ mm로 전체 중량을 기존의 486g에서 393g으로 19% 감소시킴으로써 소재의 손실이 대폭 감소되었다. 또한 추가된 후방압출공정에 의해 5th 단조공정 후 후방 nut hole을 최종제품형상에 근접(near-net shape)하게 구성함으로써 단조 후 기계 가공 시간도 2분에서 1분으로 50% 정도 단축시키는 효과를 획득할 수 있었다.

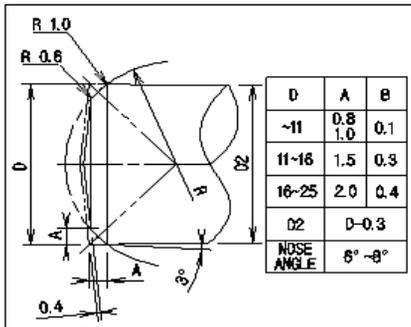
3.2 압출펀치 형상에 따른 성형하중 해석

후방압출공정이 진행될수록 압출펀치에는 큰 압출 하중이 걸리게 되고, 이로 인하여 특히 압출펀치의 코 부분에 큰 응력이 가해지게 된다. 따라서 최적의 압출코 형상을 적용하여 하중을 줄일 필요가 있다. 압출 펀치코 모양에 다른 후방압출시 하중과 응력값이 최소가 되는 최적의 압출코 형상을 적용하기 위해 후방압출 성형에 대한 핀의 설계기준으로 사용되는 냉간성형원리 입문에

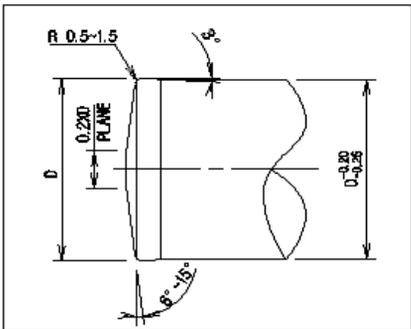
서 추천하는 형상 설계규칙을 적용하여 Fig. 6과 같이 case 1, 2 및 3을 가지고 각각 시험하였다. 각 압출코의 형상은 블랭크 재질, 구멍의 물리적 크기, 윤활유, 단면적 감소로 인한 메탈 플로우, 구멍깊이, 핀 재질과 마무리와 같은 조건에 따라



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 6 The 2-D Drawings of extrusion pin nose shapes by cold forging

변경될 수 있는데, case 1은 주로 얇은 구멍 후방 압출을 위한 압출핀 형태이며, 압출코 형상이 원뿔형태이고, case 2는 깊은 구멍 후방압출을 위한 압출핀 형상이며, 6~8° 각도를 가진 원뿔형 코는 구형코너 반지름과 랜드부경을 형성하는 릴리프 각도를 포함하는 모양이다. 이 형태의 핀 설계의 주된 장점은 랜드부가 작은 코너 반지름에 간단한 선 접촉으로 설계된다. 이것은 압출과정에서 낮은 마찰을 발생시키지만 랜드부에 더 신속한 마모를 진행시킬 수도 있다. Case 3은 최적의 동심도를 위한 압출 핀이다. 형상은 랜드부가 없는 것이 특징이고 전면에 직경의 0.2배 평탄면을 확보하여 윤활막이 유지되어 마멸깊이가 감소되고 최적의 동심도를 가진 제품을 생산하는 것이 가능하다.

압출핀에 작용하는 성형 하중값은 상용 유한요소해석 코드인 DEFORM-3D를 사용하여 해석하였다. 유한요소해석에서는 보론강에 대한 기존 데이터가 없으므로 기존의 탄소강 S45C를 재료에 대한 기본수치로 입력하여 적용하였다.

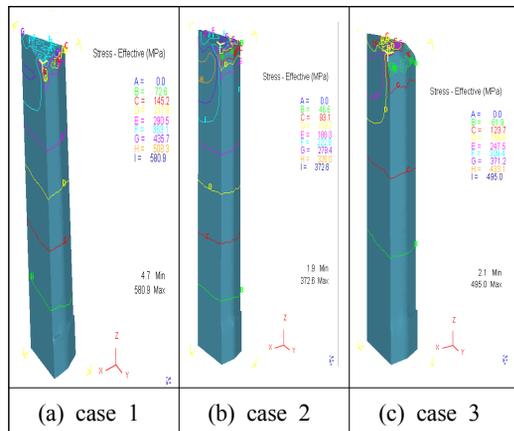


Fig. 7 Stress distribution of each extrusion pin

Fig. 7과 8에서는 압출핀에 가해지는 응력분포와 하중을 각 case 별로 나타내고 있다. 그림에서 보면 case 1일 때 국부적인 위치에 집중 응력값이 가장 높게 나타나고 있고 전면에 부분적으로 높은 응력이 발생하고 있다. Case 2에서는 전면에

보다는 내부에서 높은 응력이 발생하였고 가장 작은 응력값을 나타내고 있다. Case 3의 경우 전면 외곽부위에서 높은 응력이 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. Case 2에서 상대적으로 가장 낮은 응력이 발생한 것은 소재와 상부 핀 모서리 부위에서 소성유동(Metal flow)이 가장 원활하였기 때문이다.

Table 4에서는 후방압출 시 각 형상의 압출코에서 압출핀에 걸리는 유효응력값(effective stress, σ_{eff})을 비교하고 있다. 표에서 보면 case 2에서 가장 낮은 σ_{eff} 가 발생하였고, case 1에서 가장 높다.

Table 4 Maximum effective stress(σ_{eff}) on the extrusion pin in each case

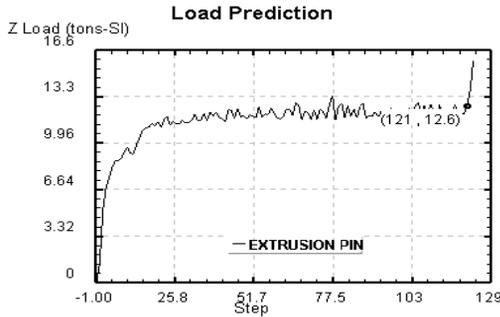
Term	Case1	Case2	Case3
σ_{eff} (MPa)	580.9	372.6	495.0

Table 5는 위의 각 형상의 압출핀을 가지고 보론강을 적용하면서 실제 단조작업을 한 후 핀의 수명을 조사한 결과를 나타내고 있다. 압출응력값 비교에서 예상되었던 바와 같이 σ_{eff} 가 가장 낮았던 case 2에서의 수명이 다른 형상에서보다 월등히 높았으며, case 3의 경우가 가장 낮은 수명을 나타내고 있다. 실제 적용응력은 case 1이 가장 높았음에도 불구하고 case 3의 수명이 가장 낮았던 것은 다른 경우와 달리 핀의 모서리 부분에서 가장 높은 σ_{eff} 가 발생하였으며 이곳이 주요 파손부위로 나타났기 때문이라고 생각된다.

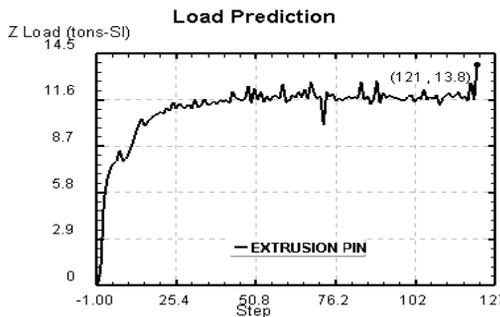
Table 5 Total number of forged samples with various shapes of extrusion pin

Term	Case 1	Case 2	Case 3
Total No. of products (ea)	4,000	15,000	3,300

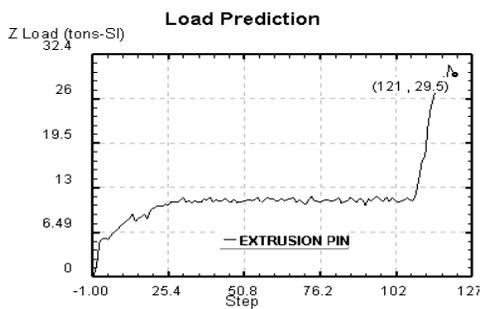
Case 2의 경우를 적용하여 탄소강 소재를 가지고 후방압출 공정을 수행한 결과 압출핀의 수명이 보론강 대비 1/3 수준인 5,000회로 나타났으며, 완제품의 기계적 성질을 비교분석한 결과, 두 제품의 차이는 거의 나타나지 않았다. 보론강이 저가 소재인 동시에 성형성이 우수하여 적절한 핀 형상을 설계하면 본 연구에서와 같이 후방압출공정이 가능하게 되어 단조공정의 최적화를 이룰 수 있다고 판단된다. 또한 기존 3 공정이던 금형 설계를 본 연구결과에서 나타난 5 공정으로 교체하여도 5 dies former를 사용하면 생산성도 기존에 비해 전혀 저하하지 않을 수 있다고 생각된다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 8 Forging forces on the extrusion pin of various types of nose shape

4. 결 론

본 연구에서는 차량용 wheel nut의 생산 시 개선했던 냉간단조 공정에 의한 보론강(51B20)의 적용 가능성을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

1) 보론강(51B20)은 기존 사용되던 탄소강(S45C)에 비해 소성가공성이 우수하고 단조 후 적당한 기계적 성질을 가지고 있어 차량용 wheel nut용 소재로서 적합하다.

2) 단조금형에서 후방압출핀을 적용하기 위해 개선된 유한요소설계를 이용한 결과, 원호형태(case 2)의 압출코를 사용 시 가장 낮은 압출응력을 얻을 수 있었고, 이 설계금형을 가지고 단조공정을 실시한 결과, 금형수명도 증가하여 단조공정의 최적화가 가능하게 되었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

1. T. Altan, 2006, "Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts, Part 1; Process method and uses" Stamping Journal, December
2. U. Engel and M. Aensel, 1990, "FEM-Simulation of Fatigue Crack Growth in Cold Forging Dies", Adv. Tech. Plast.. Vol. 1, pp. 355-360.
3. Z. Xing-hua, 1990, "Finite Element Analysis of Container and Accuracy Control of Extrusion Products", Adv. Tech. Plast.. Vol. 1, pp. 343-348.

4. J. B. Hawkyard, T. Hirai, T. Ishise and T. Katayama, 1984, "Optimisation of Shrink Ring Interference Configuration for Metal Forming Die", Adv. Tech. Plast., Vol. 2. pp. 912-917.
5. K. F. Hoffmann and K. Lange, 1989, "Computation of the Elastic Expansion and Stresses in Cold Extrusion Dies with Non-Axisymmetric Inner Shape", Trans. NAMRI of SME, Vol. XVII, pp. 71-78.
6. S. Takahashi and C. A. Brebbia, 1990, "Forging Die Stress Analysis Using Boundary Element Method", Adv. Tech. Plast.. Vol. 1, pp. 203-210
7. Y. Ochial and R. Wadabayashi, 1987, "Application of boundary Element Method to Cold Forging Die Design", Adv. Tech. Plast.. Vol. 1, pp. 37-42.
8. M. Fu and B. Shang, 1995, "Stress Analysis of the Precision Forging Die for a Bevel Gear and its optimal Design Using the Boundary- Element Method", J. Mat. Proc. Tech.. Vol. 53, pp. 511-520.
9. S. M. Lee, Y. K. Kim, H. G. Choi, J. K. Lee, Y. K. Cho, Y. T. Park and C. Y. Kang, 2010, "Effect of Forging Condition on the Microstructure and Mechanical Properties of Centrifugal Casted 9Cr-1Mo Heat- Resisting Steel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, pp. 84-89.
10. S. Y. Kang, J. S. Lee, C. H. Kim, H. K. Lee, and K. N. Lee, 1996, "Application status for automotive parts of press hardening process", Transactions of Materials Processing, Vol. 5, pp. 263-268.