

고장력볼트 냉간압조용 비조질강 특성에 관한 연구

이영선^{1#}· 최정록²· 황범규¹· 정택우¹· 문영훈³

Mechanical properties and workability of micro-alloyed steel on cold forming of high tension bolt

Y. S. Lee¹, J.M.Chi², B.K.Hwang¹, T.W.Chung², Y. H. Moon³

Abstract

The importance and interests for saving of energy and cost in industry has been steadily grown up. Therefore, process optimization to reduce the processing step and energy is one of the most important things. The micro-alloyed steel of which post-heat-treatment is not necessary, has attractive points for high strength materials. However, for the application of non-heat-treated steel to structural parts, it is necessary to confirm the reliability of mechanical properties. In order to estimate mechanical properties. The microstructure, hardness, tensile strength, compressive strength and tensile fatigue strength of micro-alloyed steel having 900MPa tensile strength has been investigated.

Key Words : Cold Forming (냉간 단조), Micro-alloyed steel (비조질강), Tensile Stress(인장 강도), FEM (유한요소법)
Compressive Stress (압축 강도), 피로 한도(Fatigue Endurance)

1. Introduction

생활의 편의를 제공하는 문명의 이기들은 대부분 많은 에너지 소비와 환경 오염을 동반하게 되므로 최근 CO₂ 저감 문제에 대한 관심을 집중시키게 요인의 주된 원인 되고 있다. 따라서, 에너지소비를 감소시키기 위해서는 생활에너지를 감소시키거나 더 나아가 생산에너지를 감소시켜야 한다. 생산에너지는 제품을 제조하는데 사용되는 전 에너지(Total Energy)로서 소재나 부품과 같은 원자재를 생산하는데 사용되는 에너지로서 역시 그 과정 동안 CO₂ 발생 또한 상당량이 발생되게 된다. 따라서, 제조공정 중에 발생되는 문제를 해결하기 위해서는 제조공정 최적화가 중요하며 열에너지와 관련된 부분의 공정최적화는 지속적으로 노력해야 할 분야라고 할 수 있다

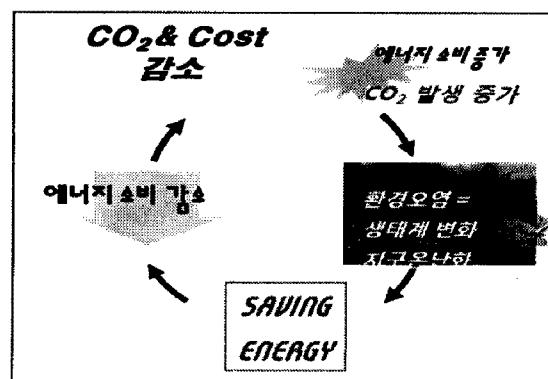


Fig. 1 Energy saving and manufacturing process

그 가운데, 하나가 최근 들어 관심이 더욱 고조되고 있는 비조질강은 이러한 에너지 절감을 위한 노력의 큰 부분에 해당된다.

비조질강은 열처리 비용의 절감을 목적으로 1972년 독일의 Thyssen 사에서 최초로 개발되었으나 1980년대 오일 쇼크를 통하여 에너지 절감의 효율성을 인정받기 시작하여 주로 유럽과 일본을

1. 회원, 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. (주)진합, 기술연구소

3. 부산대학교 기계공학부

교신저자: 이영선, lys1668@kmail.kimm.re.kr

TEL : (055)280-3522 FAX : (055)280-3570

중심으로 연구 및 개발이 심화되었다. 비조질강은 단조 후 또는 기계가공전 조질 열처리(담금질과 뜨임, Quenching and Tempering)을 통하여 기계부품의 강도를 제어하던 기존의 방식에서 벗어나 합금설계 및 제어압연/제어냉각 그리고 후속 가공공정을 통하여 부품의 강도를 확보할 수 있도록 함으로써 열처리 비용을 절약할 수 있도록 개발되었다.

비조질강은 크게 열간단조용, 냉간단조용, 직접 절삭용 비조질강으로 구별할 수 있는데, 냉간 단조용 비조질강은 주로 냉간 압조에 의해서 제작되는 볼트류를 생산하기 위한 강종으로 압연재의 신선성을 높이기 위하여 통상적으로 행하여지는 구상화 열처리와 볼트 성형 후의 강도제어를 위한 조질 열처리를 생략함으로써 열처리 비용을 절감할 수 있다. 냉간단조용 비조질강에 있어서 합금성분은 탄소강에 비하여 탄소함량을 저감하고(약 0.2wt% 내외) Mn의 함량을 증가시켜(약 1.5wt% 내외) 인성을 개선하고 제어압연과 제어냉각을 통하여 조직을 미세화시켜 압연 상태에서 필요한 강도와 인성을 확보한다. 또한 최종 제품의 강도는 신선 또는 냉간성형을 통한 가공경화를 통하여 확보되게 된다. 냉간단조용 비조질강은 열처리 비용의 절감뿐만 아니라 냉간단조 또는 압조 후 실시되는 조질 열처리를 생략함으로써 열처리 시 발생할 수 있는 제품 변형이나 균열을 사전에 방지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 조질 열처리 생략에 의한 수소지연파괴성도 우수한 것으로 알려지고 있다.

냉간 단조용 비조질강을 구조부품에 적용하는데 있어서 고려하여야 할 사항은 최종 부품의 부위별 재질 편차와 성형용 금형의 수명 감소 문제이다. 냉간단조용 비조질강은 강도확보를 위한 별도의 조질 열처리 없이 가공경화만으로 강도를 확보할 수 있도록 설계되었기 때문에 냉간성형시 제품부위별 가공량의 차이에 따라서 재질편차가 발생할 수 있다. 특히 제품 부위별 가공량의 차이가 클 경우에는 제품의 재질 편차 발생에 의해 필요 강도를 확보할 수 없게 되는 경우도 있으므로 제품의 형상 설계시 성형해석을 통하여 제품 부위별 가공량, 강도 및 재질편차를 미리 예측하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 9T급 고강도 볼트용 비조질강으로 개발, 일부사용 되고 있는 2가지 소재(선조질강, 비조질강)에 대해 압축 성형성을 분석함으로써 볼

트 성형시 미침 영향에 대한 연구를 수행하고 분석된 물성치를 이용하여 볼트성형시 발생될 수 있는 문제점에 대해 고찰해 보았다. 또한 각 비조질강의 동적특성을 분석하기 위해 원소재 상태에서 피로시험을 수행하였다. 조질강과 비조질강과의 비교는 선행 연구결과들[1~9]이 많이 있기 때문에 본 논문에서의 기술은 생략하고자 한다.

2. 실험 및 전산해석

2.1 소재 물성 분석

냉간압조용 비조질강이 가장 많이 사용되는 거부품은 여전히 볼트류로서 그 가운데 축부의 길이가 긴 롱 볼트(Long Bolt)가 주류를 이루고 있다. 롱 볼트는 조질강으로 제조할 경우 냉간 압조 후 조질처리(Q/T)를 거치는 동안 부위별 잔류응력 차이와 단류선 등에 의해 열처리 변형이 발생되어 교정작업이 필요하게 된다. 그러므로 비조질강을 이용할 경우는 볼트 성형 후 열처리 공정을 거치지 않기 때문에 열처리 변형에 의한 치수 교정작업의 수반이 필요없게 됨으로써 공정의 합리화를 꾀할 수 있게 된다.

연구에 사용된 소재는 Table 1에 나타낸 바와 같이 2가지 종류로서 저탄소강을 기반으로 Si, Mn 성분을 함유하고 있는 것이 공통적이며 Cr함량이 다소 차이를 나타내고 있다. 또한 소재 “A”는 “B”와는 달리 냉간압조전 선조질(pre-quenching-tempering) 처리를 통해 강도와 연십율을 향상시키고 선재의 부위별 재질편차를 감소시키는 효과를 도모하고 있는 것이 특징이다. 비조질강을 볼트류에 이미 사용하고 있는 일본의 경우[LH85]도 선재의 위치별 재질편차를 감소시켜야 하는 문제점을 해결하기 위해 항온변태 처리를 이용하고 있는 점이 선조질강과 유사한 점이라고 볼 수 있다.

Table 1. Chemical Compositions of micro-alloyed steels

Steel	C	Si	Mn	Cr	(unit : %)
A	0.18-0.24	0.15-0.35	0.7-1.0	0.01-0.2	
B	0.15-0.35	1.8-2.1	0.1-0.2	<0.1	

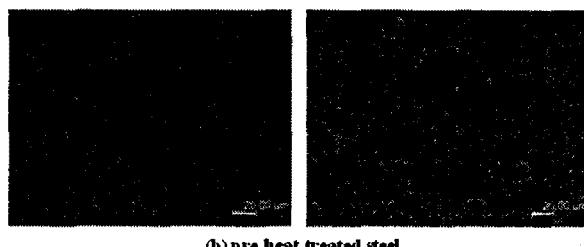
“A”, “B”소재의 원소재 상태의 조직은 Fig. 1에 나타나 있으며 그림에서 알 수 있듯이 선조질강인 “A”의 경우는 선조질 처리에 의해 발생된 temperate martensite 조직과 미세 탄화물들이 관찰되고 있다. 반면에 “B”的 경우는 전형적인 pearlite와 ferrite 조직을 나타내고 있으며 압축변형에 의해 조직이 미세화 되었음을 확인할 수 있다.

성형된 부품의 부위별 특성차이에 대한 분석을 위해 압축시험에 통해 압축변형량과 위치에 따른 경도변화를 정량적으로 분석하였으며 비조질강의 신뢰도에 크게 영향을 미칠 수 있는 동적특성에 대한 분석을 위해 피로시험을 수행하였다.

[before compression] [after compression]



(a) non-heat-treated steel



(b) pre-heat-treated steel

Fig. 1 Microstructures of micro-alloyed steels

(a) Non-heat-treated steel (b) pre-heat-treated steel

2.2 전산해석에 의한 비조질강 적용분석

냉간압조용 비조질강을 사용할 경우 조질강에 비해 냉간압조 전 소재 상태가 높은 경도를 유지하고 있는 만큼 금형 수명에 악 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2가지 비조질강을 사용할 경우 단조품의 부위별 변형분포와 금형에 가해지는 응력 등을 분석함으로써 금형강도 저하에 의한 생산성 저하문제에 대한 대책수립에 이용하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소재 물성 분석

3.1.1 인장강도 및 연신율

본 연구에서 사용된 비조질강은 일본의 LH85소재와 가장 유사한 특성을 나타내는 것으로 서로 비교하여 정리하면 인장강도와 연신율은 Table 2와 같다.

Table 2. Tensile strength and elongation of micro-alloyed steel

	Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	El. (%)
LH85	858.4	889.9	15.5
“A”	771.4	833.9	15.8
“B”	731.7	851.2	11.4

“A”소재는 LH85 소재보다 50MPa 정도 낮은 항복강도와 인장강도를 나타내고 있으나 연신율은 동일한 수준이며 “B”소재는 항복강도는 100MPa 이상 인장강도는 30MPa 정도 낮은 값을 나타내고 있다. 결국 “B”소재의 경우가 인장응력 상태에서 보다 큰 가공경화특성을 나타내고 있으며 상대적으로 낮은 연신율을 나타내고 있다. 결국, 경화지수를 높여 단조시 가공성(Workability)을 향상시키고 있음을 알 수 있다. 반면 연신율은 11.4%로서 상대적으로 낮은 성형성(Formability)을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.1.2 압축강도

다소 차이가 보이는 인장특성과는 달리 압축특성은 거의 유사한 값을 나타내고 있으며 가공경화지수 또한 0.1이하의 매우 낮은 값을 동일한 값을 나타내고 있다. 압축강도에서의 가공성과 성형성은 3가지 소재 모두 0.7~1.0이상의 우수한 특성을 나타내고 있어 성형 중 인장응력에 의한 크랙은 발생 가능성이 매우 낮음을 예측할 수 있다.

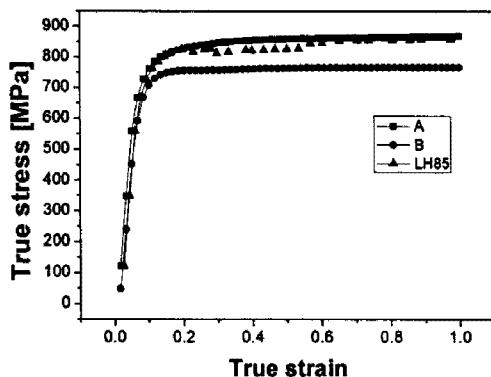


Fig. 2 Flow stresses of micro-alloyed steels measured by compressive test

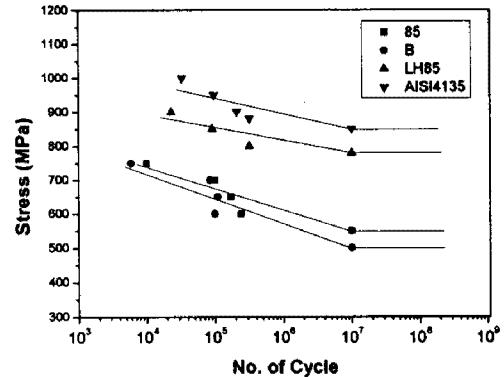


Fig. 3 Fatigue strength of each micro-alloyed-steel

3.1.3 피로한도

피로한도는 인장특성과 같은 정적특성과 함께 구조부품으로 사용되는 소재의 경우에 신뢰성 향상을 위해 반드시 필요한 항목이다. 따라서 본 연구에서는 인장-인장($R=0.1$)상태에서의 고주기 피로시험을 수행하여 각 소재의 피로한도를 분석하였다. 피로시험에 사용된 시험기는 250KN의 자기공명피로시험기로서 80Hz이상의 고속에서 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 소재별 고주기 피로시험의 결과로서 LH85, “A”, “B”순으로 높은 피로한도를 나타내고 있다. 결국, 항복강도와 인장강도의 특성에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 피로시험에 사용된 LH85는 Baking(저온소둔)처리 후의 소재를 이용하여 수행된 결과로서 저온소둔 후에는 LH85소재의 항복강도, 인장강도가 50~80MPa이상의 특성향상이 된 상태로서 상대적으로 100MPa이상 높은 특성의 소재와 비교된 것으로 상대 비교시 이를 고려해야 하는 실정이다.

결국, 비조질강의 피로특성은 비정상적인 소재를 이용하는 경우를 제외하고는 정적강도와 비례하는 것으로 판단할 수 있다.

3.1.4 롱 볼트 시제품

평가된 소재를 이용하여 제조된 부품은 M6 롱 볼트(Long Bolt)로서 Fig. 4와 같은 공정을 거쳐 제조하였다. 절단-전방압출-전방압출-업세팅-볼트

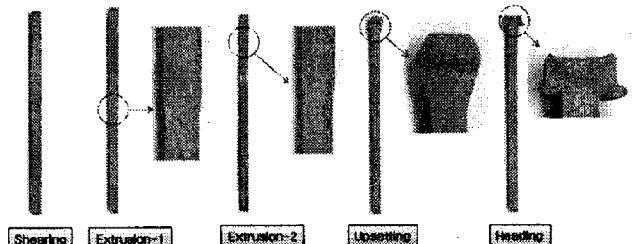


Fig. 4 Cold forming processes of long bolt

성형의 4단 성형공정을 통해 최종제품으로 성형하였다. 그림에서 알 수 있듯이 볼트 머리(Head)부분을 제외하고는 축부의 길이가 매우 길기 때문에 조질강을 이용할 경우는 부위별 잔류응력 차이에 의해 치수변화를 나타낼 수 있음을 예측할 수 있다.

3.2 성형 및 금형응력 분석을 위한 전산해석

시제품 제조에 필요한 정보를 얻기 위해 전산해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 FORGE-2D & 3D™으로서 강소성해석을 이용하여 4공정에 대한 성형해석과 각 공정의 금형응력을 분석하였다. Fig. 5는 소재별 해석결과를 나타내고 있는데, “A” 소재의 경우가 “B”소재의 경우에 비해 30% 수준 까지 유효응력이 높게 나타나고 있는데, 소재의 유동응력의 차이에 의해 발생된 미소한 격차를 보이고 있다. 반면 금형에 가해지는 응력분포는 2가지 소재 모두 유사한 값(최대 주응력을 나타내고 있다. Fig. 5는 소재에 따른 공정별 성형해석 결과를 나타내고 있다.

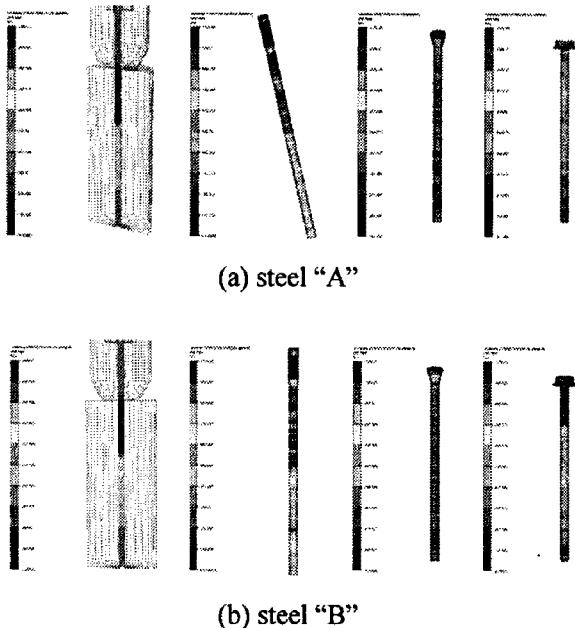


Fig. 5 Results of forming analysis for long bolt

4. 결론

환경오염 방지와 원가절감의 2가지 목적을 동시에 만족시킬 수 있는 냉간압조용 비조질강은 현재 800MPa의 강도를 요구하는 부품, 특히 자동차용 볼트류에 널리 이용되기 시작하였으며 900MPa이상의 고장력 볼트에 이르기 까지 개발이 활발히 진행되고 있다. 이를 위해 수행된 본 연구는 경제적 효과와 환경적 효과를 동시에 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나, 소재의 변경에 따른 신뢰성 입증을 위해 소재 및 부품 단위의 신뢰성 데이터 생성이 추가적으로 이루어져야 할 것이며 추가 연구진행이 이루어 질 것이다.

5. References

- [1] K.Kondo and K.Ohga, "Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method", Int. J. Mach. Tools Manufact. 35, 8, 1995, pp1105-1113.
- [2] Hung-Hsiou Hsu, "A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method", Int. J. of Mechanical Sciences, 44, 8, 2002, pp1543-1558
- [3] M.L.Alves, J.M.C.Rodrigues and P.A.F.Martins, "Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation", Finite Elements in Analysis and Design, 37, 6-7, 2001, pp549-558
- [4] N.R.Chitkara and M.A.Bhutta, "Shape heading of splines and solid spur gear forms: an analysis and some experiments", Int. J. of Mechanical Sciences, 43, 4, 2001, pp1073-1106
- [5] Jongung Choi, Hae-Young Cho and Chang-Yong Jo, "Forging of spur gears with internal serrations and design of the dies", J. of Materials Processing Technology, 104, 1-2, 2000, pp1-7
- [6] J.C.Chi and Y.Chi, "Precision forging of spur gears with inside relief", Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 39, 10, 1999, pp1575-1588
- [7] Y.S.Lee, J.H.Lee, Y.N.Kwon, T.Ishikawa, "Experimental and FE analysis to predict the dimensional changes of workpiece and tool in cold forging", Proc. of Int. Conf. NUMIFORM2004 (2004), pp504-509
- [8] J.R.Cho, W.J.Kang, M.G.Kim, J.H.Lee, Y.S.Lee, W.B.Bae, "Distortion induced by heat treatment of automotive bevel gears", J. of Materials Processing Technology, 153-154(2004), 476-481
- [9] Y.S.Lee, J.H.Lee, Y.N.Kwon, T.Ishikawa, "FE-modeling approaches to accurate dimension prediction for the cold forged part", J. of Engineering Manufacture B, 218(2004), pp1709-1722