

## 고장력볼트 냉간압조용 비조질강 특성에 관한 연구

황범규<sup>1</sup> · 정택우<sup>1</sup> · 이영선<sup>#</sup> · 최정묵<sup>2</sup> · 문영훈<sup>3</sup>

# Mechanical Properties and Workability of Non Heat Treated Steel on Cold Forming of High Tension Bolts

B. K. Hwang, T. W. Jung, Y. S. Lee, J. M. Choi, Y. H. Moon

(Received December 4, 2009 / Revised April 21, 2010 / Accepted May 6, 2010)

### Abstract

The importance and interests for saving of energy and cost in industry has grown up. Therefore, process optimization to reduce the process and energy become one of the most important things. The non-heat treated steel, post-heat-treated is no necessary, has attractive points as structural materials. However, establishment of mechanical properties is necessary to apply non-heat-treated steel to structural parts. In this study, for non-heat-treated steel and pre-heat-treated steel, we have investigated microstructure, hardness, the tensile strength, compressive strength. And the FE analysis technology to predict the hardness value of forged part is developed on micro-alloyed steel forged part.

**Key Words** : Cold Forging, Non-Heat Treated Steel, Tensile Stress, FEM, Compressive Stress, Fatigue Endurance

### 1. 서 론

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

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. (주)진합, 기술연구소

3. 부산대학교 기계공학부

# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,

E-mail: lys1668@kims.re.kr

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 수소 지연 파괴성도 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 재질편차 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 인장강도 90kg/mm<sup>2</sup>급 고강도 볼트용 비조질강으로 개발, 일부 사용되고 있는 2가지 소재(선조질강, 비조질강)에 대해 압축 성형성을 분석함으로써 볼트 성형시 미칠 영향에 대한 연구를 수행하고 분석된 물성치를 이용하여 볼트 성형시 발생할 수 있는 문제점에 대해 고찰해 보았다. 그리고 일본에서 사용되고 있는 비조질강 소재인 LH85와 기계적 물성을 비교하였다. LH85 소재는 성형성을 향상을 위해 탄소 함량을 감소시키고 변형저항과 가공경화율을 증가시키기 위해 Mn 함량을 증가시킨 소재로 제어압연과 제어냉각을 통해 조직을 미세화시켜 기계적 성질을 얻은 소재이다. 또한 각 비조질강의 동적특성을 분석하기 위해 원소재 상태에서 피로시험을 수행하였다. 조질강과 비조질강과의 비교는 선행 연구 결과들[1~8]이 많이 있기 때문에 본 논문에서의 기술은 생략하고자 한다.

## 2. 실험 및 수치해석

### 2.1 소재 물성 분석

냉간압조용 비조질강이 가장 많이 사용되는 부품은 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

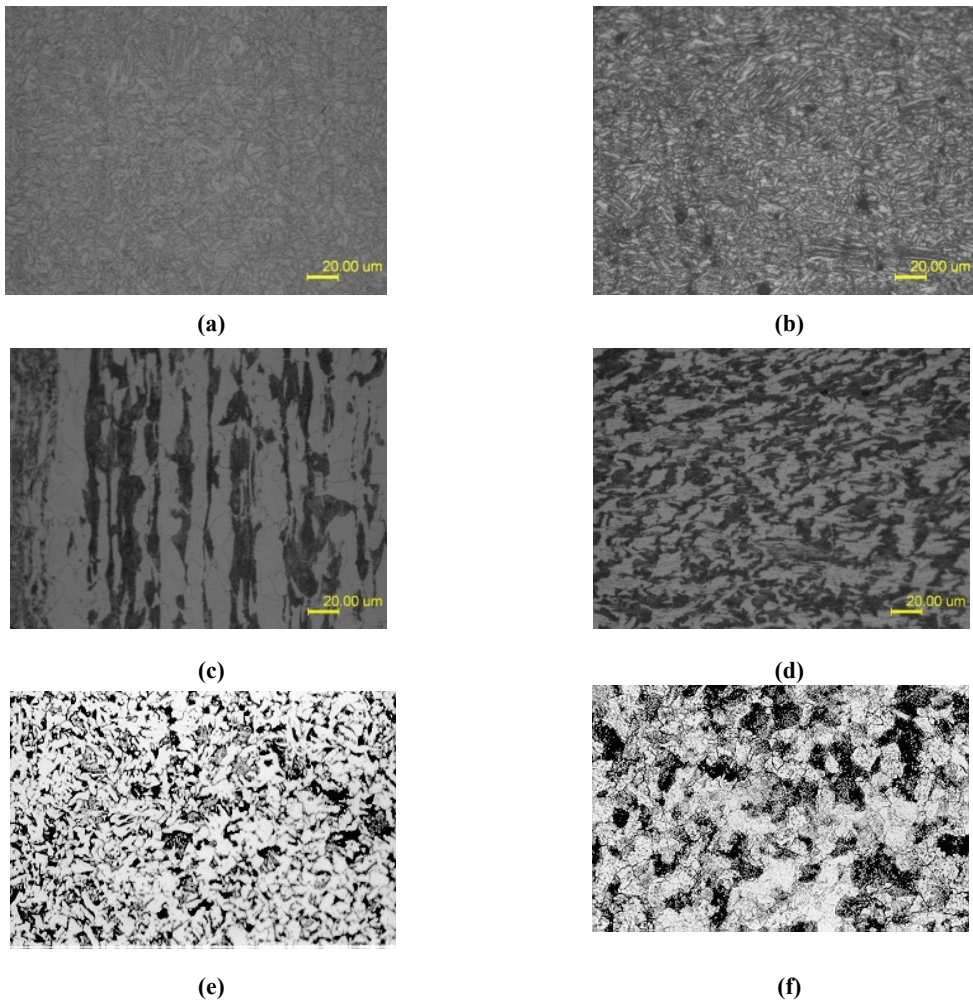
교정작업이 필요하게 된다. 그러나 비조질강을 이용할 경우는 볼트 성형 후 열처리 공정을 거치지 않기 때문에 열처리 변형에 의한 치수 교정작업의 수반이 필요 없게 됨으로써 공정의 합리화를 꾀할 수 있게 된다.

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 ESW85(선조질강)는 P-B(비조질강)와는 달리 냉간압조 전 선조질(Pre-Quenching-Tempering) 처리를 통해 강도와 연신율을 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**  
(unit : %)

Steel	C	Si	Mn	Cr
ESW85	0.18-0.24	0.15-0.35	0.7-1.0	0.01-0.2
P-B	0.15-0.35	1.8-2.1	0.1-0.2	<0.1
LH85	0.19~0.25	0.1~0.35	1.35~1.65	-

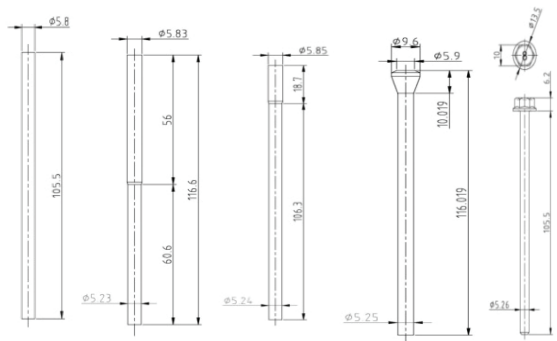
ESW85, P-B소재의 원 소재 조직은 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 ESW85의 Fig. 1(a), (b)의 경우는 선조질 처리에 의해 발생된 템퍼드 마르텐사이트(Tempered Martensite) 조직과 미세 탄화물들이 관찰되고 있다. 반면에 P-B소재에 대한 Fig. 1(c), (d)의 경우는 전형적인 펄라이트(Pearlite)와 페라이트(Ferrite)조직을 나타내고 있으며 압축 변형에 의해 조직이 미세화 되었음을 확인 할 수 있다. Fig. 1(e)에서는 LH85 냉간단조 전 조직을 나타내고 있고, Fig. 1(f)는 AISI4135 냉간단조시 성형성 향상을 위하여 구상화소둔 처리된 상태(구상화율.약 95% 이상)를 나타내고 있다. LH85 소재는 제어압연을 통하여 미세한 페라이트-펄라이트 조직을 나타내고 있다. 성형된 부품의 부위별 특성차이에 대한 분석을 위해 압축 시험을 통해 압축변형량과 위치에 따른 경도변화를 정량적으로 분석하였으며 비조질강의 신뢰도에 크게 영향을 미칠 수 있는 동적특성에 대한 분석을 위해 피로시험을 수행하였다.



**Fig. 1** Microstructures of micro-alloyed steels, (a) as-received, ESW85 (b) as-deformed, ESW85 (c) as-received, P-B (d) as-deformed, P-B (e) as-controlled, cooling non heat treated steel(LH85), (f) as-spheroidized, annealed heated treated(AISI4135)

## 2.2 냉간성형에 대한 수치해석

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 비조질강 및 선조질강의 공정별 응력을 비교하여 나타내었다. 그리고 각 소재 단조품의 부위별 변형률 분포와 가해지는 응력을 분석하였다. Fig. 2에 공정별 형상을 나타내었고 강소성해석을 위해 상용프로그램인 FORGE-2D&3D™을 이용하였다. 성형해석에 사용된 조건으로 펀치속도 100mm/sec, 쿨롱 마찰계수(Coulomb Friction Coefficient) 0.08을 사용하였고, Fig. 3의



**Shearing Extrusion-1 Extrusion-2 Upsetting Heading**  
**Fig. 2** Forming process sequence for the long bolts

압축 시험에 의한 유동응력 곡선을 이용하여 1공정에서 3공정까지 2차원 축대칭 해석을, 마지막 4공정은 3차원 성형해석을 수행 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 소재 물성 분석

##### 3.1.1 인장강도 및 연신율

본 연구에서 사용된 비조질강은 일본의 LH85 소재와 가장 유사한 특성을 나타내는 것으로 서로 비교하여 정리하면 인장강도와 연신율은 Table 2와 같다.

**Table 2 Tensile test result of the non heated and pre heat treated steel(as-received)**

	Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	El.(%)
LH85	858.4	889.9	15.5
ESW85	771.4	833.9	15.8
P-B	731.7	851.2	11.4

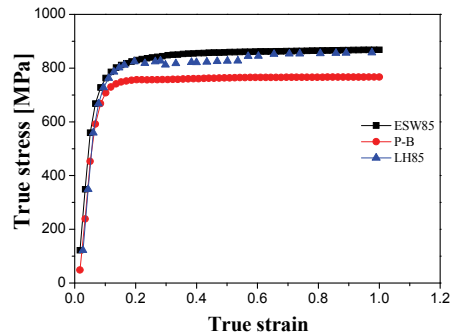
**Table 3 Tensile test result of the non heated and pre heat treated steel(after baking)**

	Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	El.(%)
LH85	848.1	902.3	15.4
ESW85	818.8	835.2	20.4
P-B	835.9	910.6	19.2

ESW85 소재는 LH85 소재보다 50MPa 정도 낮은 항복강도와 인장강도를 나타내고 있으나 연신율은 동일한 수준이며 P-B 소재는 항복강도는 100MPa 이상, 인장강도는 30MPa 정도 낮은 값을 나타내고 있다. P-B 소재의 경우가 인장응력 상태에서 보다 큰 가공경화특성을 나타내고 있으며 상대적으로 낮은 연신율을 나타내고 있다. 그리고 저온소둔(Baking 350℃, 30min)처리 후 모든 소재가 항복강도 및 인장강도가 증가한 것을 Table 3을 통해 알 수 있으며, P-B 소재가 약 60MPa 이상으로 증가함을 알 수 있다.

##### 3.1.2 압축강도

강도와 연신율 면에서 다소 차이를 보이는 인장특성과는 달리 압축특성은 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. Table 4에 나타난 가공경화지수(n)



**Fig. 3 Flow stresses of non heat treated steels and pre heat treated steel measured by compressive test**

**Table 4 Compression test result of the non heated and pre heat treated steels**

$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$	K(MPa)	n
ESW85	874.8	0.035
P-B	780.5	0.040
LH85	862.6	0.049

또한 0.1이하의 매우 낮은 값을 나타내고 있다. 압축강도에서의 성형성은 3가지 소재 모두 변형율이 1.0이상의 우수한 특성을 나타내고 있다(Fig. 3). 따라서 성형 중 압축응력에 의한 크랙은 발생 가능성이 매우 낮음을 예측할 수 있다.

#### 3.1.3 경도측정

ESW85, P-B소재에 대한 경도 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 압축 전 평균값을 비교하였을 때 P-B소재는 255(Hv) ESW85소재는 263(Hv)로 ESW85소재가 조금 높게 나타났으며, 압축 후에도 두 소재 모두 전체적인 경도 값이 증가하였고, ESW85소재가 더 높게 나타남을 알 수 있다.

#### 3.1.4 피로특성

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 자기

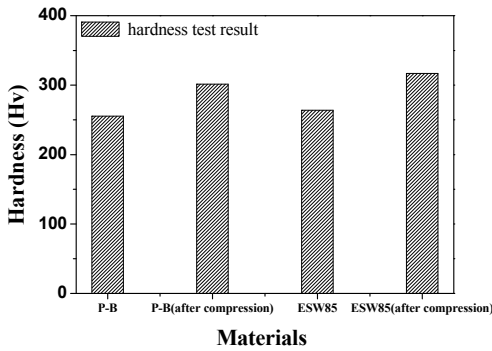


Fig. 4 Hardness test of the non heat treated and pre heat treated steel

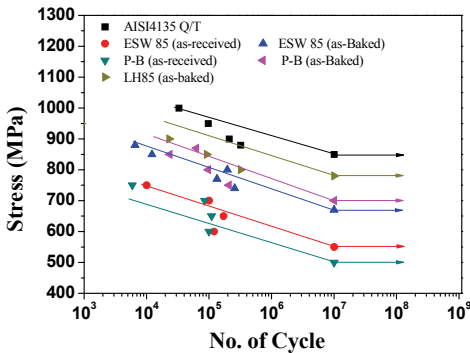


Fig. 5 Fatigue strength of each micro-alloyed-steel

공명피로시험기로서 80Hz이상의 고주파에서 시험을 수행하였다.

Fig. 5은 소재별 피로시험의 결과로서 LH85, ESW85, P-B순으로 높은 피로한도를 나타내고 있다. 결국, 항복강도와 인장강도의 특성에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 피로시험에 사용된 LH85는 저온소둔 처리 후의 소재를 이용하여 수행된 결과로서, 이와 같은 조건으로 피로한도를 알기 위해 ESW85, P-B소재를 저온소둔 처리를 하여 결과를 비교 하였다.

ESW85, P-B는 저온소둔 후에는 약100MPa이상 피로한도가 올라간 것을 알 수가 있다. 결국, 비조질강의 피로특성은 비정상적인 소재를 이용하는 경우를 제외하고는 정격강도와 비례하는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.1.5 비조질강 시제품(long bolt)

평가된 소재를 이용하여 제조된 부품은 M6 롱볼트(Long Bolt)로서 Fig. 6와 같은 공정(절단-전방압출-전방압출-업세팅-볼트)을 거쳐 제조하였다.

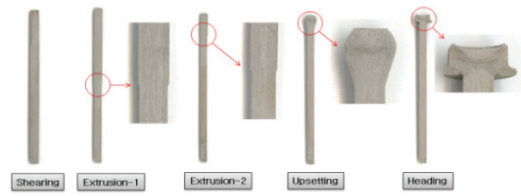


Fig. 6 Cold forming processes of long bolts

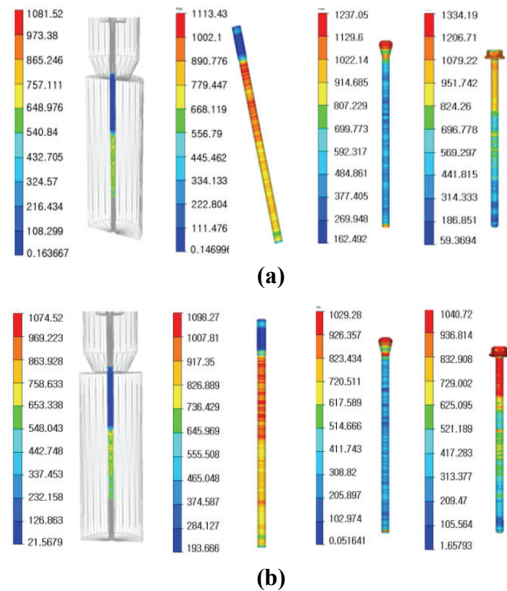


Fig. 7 Effective stress of forming analysis for long bolts (a) (ESW85), (b) (P-B)

초기소재는 4단 성형공정을 거쳐 최종제품으로 성형된다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 볼트 머리(Bolt Head)부분을 제외하고는 축부의 길이가 매우 길기 때문에 조질강을 이용할 경우는 부위별 잔류응력 차이에 의해 치수변화가 발생할 가능성이 높음을 예측할 수 있다.

### 3.2 냉간성형 분석을 위한 수치해석

시제품 제조에 필요한 정보를 얻기 위해 Table 3에서 P-B, ESW85소재의 재료특성을 바탕으로 수치해석을 수행하였다. 유한요소해석으로 실시한 후의 결과를 Von Mises 항복 조건식에 의한 유효응력(Von Mises stress)값으로 비교하여 Fig. 7(a)에서 살펴보면 1공정에서의 최고(Peak point)값은 1081MPa, 2공정 1113MPa, 3공정 1237MPa, 4공정 1334MPa로 나타났고, Fig. 7(b) P-B소재에서 1공정은 1040MPa, 2공정 1029MPa, 3공정 1098MPa, 4공정에서는 1074

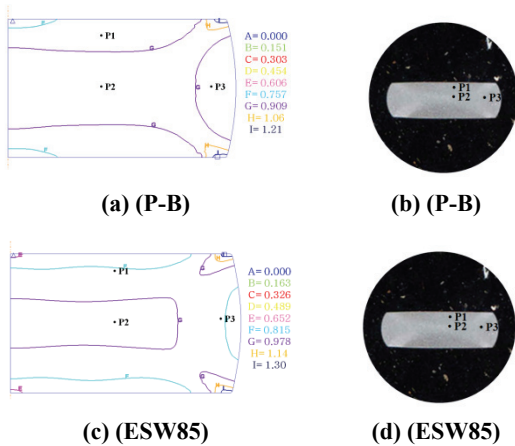


Fig. 8 (a) Effective strain of as-received(P-B), (b) hardness of as-received(P-B), (c) Effective strain of as-received(ESW85), (d) hardness of as-received(ESW85)

Table 5 Effective strain and hardness of as-received (after compression)

	as-received (P-B)		as-received(ESW85)	
	Effective strain	Hardness (Hv)	Effective strain	Hardness (Hv)
P1	0.846	261.7	0.848	276.5
P2	1.02	286.3	1.03	302.1
P3	0.862	267.8	0.834	279.8

Table 6 Effective strain and hardness of bolt head

	Bolt head(P-B)		Bolt head(ESW85)	
	Effective Strain	Hardness (Hv)	Effective Strain	Hardness (Hv)
P1	0.850	259.2	0.799	332.4
P2	1.37	329.7	1.27	395.5

MPa로 ESW85소재가 P-B소재 보다 평균 10% 이상 높은 응력값을 나타내고 있다. 응력차이는 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 유동응력이 ESW85소재가 P-B소재 보다 10%정도 높기 때문에 판단된다. 최종 제품이 무열처리 상태인 비조질강 단조품은 부위별 경도가 제품 특성에 직접적인 영향을 미치므로 수치해석을 통해 경도를 예측하고자 하였다. Fig. 8과 Table 5는 봉상 압축시험편의 압축후 변형율과 경도분포를 Fig. 9와 Table 6은 볼트 단조품의 변형율과 경도 분포를 나타내고 있다. 해석 결과로부터 부위별 경도 분포 예측이 매우 정확함을 알 수 있으며 경도에 따른 기계적 물성 예측에 대한 데이터 구축을 통해 비조질강의 기계적 특성 예측 가능성을 높여 주고 있다.

#### 4. 결론

냉간압조용 비조질강은 현재 800MPa의 강도를 요구하는 부품, 특히 자동차용 볼트류에 널리 사용되고 있으며 900MPa이상의 고장력 볼트에 이르기 까지 개발과 함께 적용이 적극적으로 진행되고 있다. 그에 따라 비교 대상 소재들의 특성분석을 통해 적용 가능한 비조질강들의 정·동적 특성을 정량화 하였으며, 정리하면 다음과 같다.

비조질강과 선조질강의 정적강도를 비교하였을 때 인장강도는 LH85, ESW85, P-B 소재 순서로 나타났다. 그리고 저온소둔 처리 후 인장시험 결과, 항복강도 및 인장강도가 전체적으로 증가하였다. 특히 P-B소재는 다른 소재에 비해 상대적으로 크게 증가하였다. 반면 압축강도는 거의 유사한 압축강도와 가공 경화지수를 나타내었다.

ESW85, P-B소재의 피로특성을 통해 동적강도를 비교하였을때 저온소둔 처리 후 LH85보다 피로한도가 조금 낮지만 유사하게 나타남을 알 수 있다. 결국 피로한도는 열처리 한 강의 경우도 정적강도와 비례함을 확인하였다.

비조질강과 선조질강의 원소재와 볼트성형의 수치해석을 통해 경도와 변형율을 비교 하였을

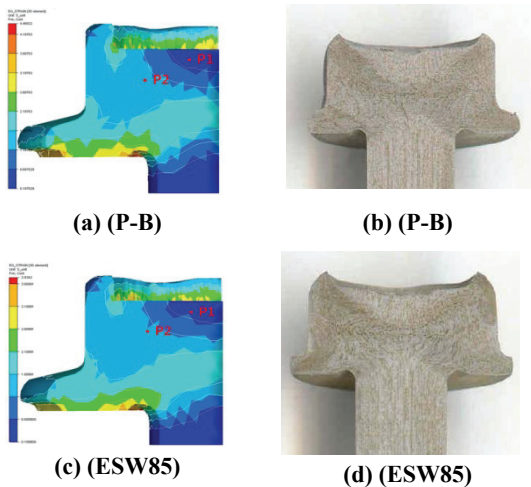


Fig. 9 (a) Effective strain of bolt head (P-B), (b) hardness of bolt head (P-B), (c) Effective strain of bolt head (ESW85), (d) hardness of bolt head (ESW85)

때 압축 시험을 통해 분석된 상관 관계와 결과치와 동일한 결과를 나타내었다. 이 결과들로부터 비조질강의 경우는 데이터 정량화와 해석을 통해 경도와 기계적 성질의 예측이 가능함을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Kanisawa, T. Mori, Y. Okuno, 1990, Development of wire rod with low flow stress for non-heat-treated fasteners, *Wire. J. Int.*, pp. 32~37
- [2] D. Rasouli, Sh. Khameneh Asl, A.Akbarzadeh, G.H.Daneshi, 2009, Optimization of mechanical properties of a micro alloyed steel, *mater. And Des*, Vol.30, issues.6, pp. 2167~2172.
- [3] Y. S. Lee, J. H. Lee, S. Y. Lee, J. H. Kang, J. H. Kim, 1998, The study on mechanical properties and formability of non-heat-treated and heat-treated cold forging materials, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 224~230.
- [4] A. Seshu Kumar, B. Ravi Kumar, G. L. Datta, V. R. Ranganath, 2010, Effect of microstructure and grain size on the fracture toughness of a micro alloyed steels, *Mater. Sci.Eng., A*, Vol.527, Issues.1-3, pp. 954~960.
- [5] D. L. Lee, 2002, The current status of the development of heat-treatment-free steel, *Trans. Mater. process*, Vol.11, No. 5, pp. 388~393.
- [6] D. W. Suh, Y. S. Lee, Y. N. Kown, J. H. Lee, 2004, Characterization of microstructure and mechanical properties of micro-alloyed cold forging steel and product, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 409~412.
- [7] Okan Topcu, Mustafa Ubeyli, 2009, On the microstructural and mechanical characterizations of a low carbon and micro alloyed steel, *Mater. Des.*, Vol. 30, Issue. 8, pp. 3274~3278.
- [8] Y. S. Lee, J. H. Lee, S. Y. Lee, 1998, The study on the mechanical properties and formability of non-heat-treated cold forging steels, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 7, No. 6, pp. 530~538.
- [9] D. Eifler, E. Macherauch, 1990, Microstructure and cyclic deformation behavior of plain carbon and low-alloyed steels, *Int. J. Fatigue*. 12, No. 3, pp. 165~174.