

베이킹 온도에 따른 비조질강 기계적 특성

이승현[#]· 이교택¹· 권용남²· 김지훈¹

A Study on Mechanical Properties of Micro-Alloyed Steel According to Baking Temperature

S. H. Lee, K. T. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Kim

(Received October 12, 2006)

Abstract

Recently, micro-alloyed steels which could eliminate heat treatments after forging has been developed. These non heat-treated micro-alloyed steels have several advantages over the conventional quenched and tempered steel for cold forging. First of all, long components can be fabricated with a better dimensional accuracy since bending of long forged part after quenching treatment could be avoided. And it is possible to eliminate two energy consuming heat treatment steps, which are a spherodizing before forging and quenching/tempering after forging. Therefore, more cost effective and environment friendly process could be designed. However, there is non-uniform distribution of strain occurred across the forged part, since these non heat-treated micro-alloyed steel use strain hardening mechanism. In the present study, it was investigated how to lessen non-uniformity and increase strength together for cold forging when a baking heat treatment is applied in micro-alloyed steels. For this purpose, micro-alloyed steels developed by Se-A Besteel recently was used for the experiment.

Key Words : Micro-Alloyed Steel, Mechanical Properties, Baking Treatment, Strain Ageing

1. 서 론

자동차부품 중에서 엔진부품, 조향부품 등 고부하가 걸리는 부품은 강을 냉간 또는 열간 단조한 후 조질처리(quenching & tempering) 그리고 고주파 소입 등의 열처리 공정을 거쳐 기계가공으로 제조되는 것이 대부분이다. 이 제조공정 중에서 조질공정의 목적은 부품 전체를 열처리해서 부품에 필요한 강도 및 인성을 부여하는 것이다. 하지만, 길이가 긴 화스너(fastner)부품들은 담금질(quenching) 후에 변형이 발생할 가능성이 매우 높다. 또한 변형이 발생한 부품의 경우 교정 등의 후속 공정이 필요해 매우 복잡한 공정 설계가 요구된다. 이에

따라 담금질 과정을 생략하고도 부품이 요구하는 기계적 특성을 가질 수 있는 장이 필요하게 되었다. 비조질강은 기존 조질강(quenched and tempered steel)에 대비되는 개념으로 조질공정을 생략하고도 특정부품에서 요구되는 특성을 얻을 수 있는 것이 것이다. 비조질강은 앞서 언급한 담금질 공정 뿐만 아니라 조질강의 냉간 단조시 강 속의 탄화물을 구상화시킴으로써 가공성이 높이는 구상화 열처리(spheroidizing heattreatment) 과정도 생략할 수 있어 에너지 절감에 매우 효과적인 소재이다.

비조질강은 1970년대 초반 서독에서 처음 개발되었는데 이상의 이유로 인해 1979년 제2차 석유

1. 주)선일다이파스

2. 한국기계연구원

교신저자: 주)선일다이파스, E-mail: seunghun@sunildyfas.com

위기를 계기로 이에 대한 관심과 연구력이 더욱 집중하게 되었다. 국제 유가의 상승에 따라 에너지 절감의 중요성이 높아짐에 따라 비조질강의 적용을 통한 부품 제조 경쟁력을 높이고자 하는 시도가 매우 활발하게 이루어지고 있으며 특히 일본 및 유럽에서는 이미 다양한 모델에 적용된 사례를 확인할 수 있다.

비조질강은 열처리 공정의 생략에 따른 에너지 절감, 열처리 변형제거, 휨 교정 작업의 최소화를 비롯하여 소재원가 절감, 절삭성 향상 등의 장점을 가진다. 비조질강의 강화기구는 냉간 단조품 제조에 사용되어 온 기존 중·저 탄소강과는 달리 V, Ti, Nb 등과 같은 합금원소를 첨가하여 페라이트상내에 미세한 입자를 석출하는 개념을 이용하고 있다. 추가적인 강화 방법으로 압연, 신선, 냉간 단조를 거치는 과정 중의 축적되는 가공경화를 이용하는 것이다. 따라서 비조질강의 경우 단조제품의 부위별 가공량 차이에 따라 성형품의 부위별 강도 분포의 변화의 가능성성이 높다. 또한, 상당한 양의 가공경화가 축적되어 있어 비조질강 단조품은 피로 특성 등이 낮아질 가능성이 높다.

최근, 자원 및 에너지 절감에 대한 분위기가 고조되면서, 화스너 업계에서도 볼트 제조 공정의 에너지 및 원가를 절감과 동시에 기계적 특성이 향상된 부품의 제조가 요구되어 오고 있다. 예를 들어 기존 조질강을 사용하여 인장강도 70kg/mm^2 이상의 고장력 볼트를 제조할 경우 조질처리를 통해 요구 물성을 쉽게 만족할 수 있었으나 비조질강을 사용할 경우 앞서 언급한 바와 같이 여러가지 문제점이 발생할 가능성이 높다.

이에 따라 본 연구에서는 비조질강의 냉간 단조 후 베이킹 처리를 실시함으로써 단조품 내에 기계적 특성의 차이를 낮춤과 동시에 볼트 단조품이 요구하는 다양한 기계적 물성을 획득할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 본 연구에 사용한 소재는 최근 세아베스틸에서 개발된 80 및 90kg/mm^2 급의 비조질강(SHCW80L/90)이다. 본 연구를 통하여 SHCW80L/90 소재가 기존의 조질처리소재의 대체소재로 적용 가능한지에 대하여 검토하고, 또한 베이킹 처리 온도에 따른 비조질강 제품의 기계적 특성 변화를 분석하여 개발된 비조질강의 양산 적용시 유의사항 및 고려 되어야 할 사항에 대하여 검토하였다.

2. 본 론

2.1 냉간단조용 비조질강 특징

비조질강의 기본개념은 선재 상태에서 구상화풀림 소재가 가지는 우수한 가공성 및 조질강이 가지는 인성과 강도를 동시에 지니고 있어야 한다. 즉 선재 상태에서 우수한 강도, 인성 및 연성을 가져야 한다. 이런 요구 조건을 만족시키기 위해서는 강의 성분조정과 선재 제조 공정 제어가 필수적이다.

본 연구에서는 2종의 비조질강 및 비교를 위해 조질강 1종이 사용되었다. 비조질강은 세아베스틸에서 제어압연/냉각 공정을 거쳐 최종 $\Phi 16\text{mm}$ 의 압연재로 제조되었다. 이후 본 연구에서 대상 부품으로 선정한 자동차 브레이크부의 Guide rod pin의 성형에 적합한 직경으로 냉간 신선이 수행되었다. Guide rod pin은 90kg/mm^2 급의 강도가 요구되는 냉간 단조품이다. 본 연구에 사용된 3종 강종의 성분은 Table 1에 나타내었다. 성분에서 알 수 있듯이 기존 조질강에 비해 비조질강은 저탄소 합금강으로 미세조직은 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)상으로 구성된 이상조직강이다. 비조질강의 결정립이 $5\sim6\mu\text{m}$ 수준으로 매우 미세한 조직을 가지는 특징이 있다.

3종의 소재에 대해 인장시험을 실시한 결과를 Table 2에 나타내었다. 비조질강 소재 2종은 $\Phi 16\text{mm}$ 의 압연재 및 $\Phi 14.7\text{mm}$ 로 냉간신선한 소재를 사용하였다. 비조질강은 단조 전 소재 상태에서 인장강도가 조질강 대비 29~41% 정도로 높음을 알 수 있고 또한 연신율도 17% 정도로 조질강에 비해 낮은 단조성을 가질 것으로 예상된다.

Table 1 Chemical composition of 3 steels used in this study

	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V	Al
A	0.15	0.13	1.01	0.01	0.0082	0.10	0.35	0.061	0.019
B	0.17	0.12	1.25	0.009	0.0083	0.12	0.35	0.08	0.014
C	0.35	0.25	0.6	0.015	0.015		0.9		

A : SHCW80L (SeAH Besteel:Micro-alloyed steel)

B : SHCW90 (SeAH Besteel: Micro-allyed steel)

C: SCM435(SA)(POSCO:Alloyed steel)

Table 2 Mechanical properties of 3 steels used in this study

	T/S (Kg/mm ²)	YS (Kg/mm ²)	EL(%)	ROA
A	75.2	63.4	18	75.2
B	82	66	16	65
C	58	50.4	25	85

2.2 단조제품의 기계적 특성평가

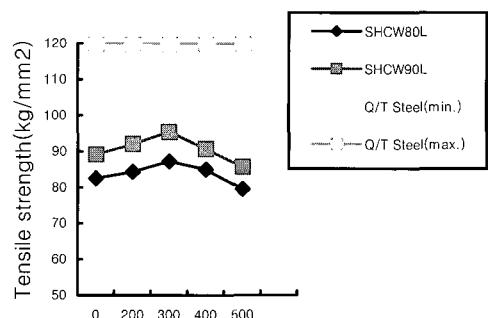
본 연구에서는 비조질강을 이용하여 Guide rod pin 을 성형한 후 베이킹 처리(baking treatment)에 따른 단조품의 기계적 특성 변화를 고찰하고자 하였다. 본 연구에 사용한 비조질강을 이용한 Guide rod pin 의 냉간 단조에 대해서는 다른 논문에 일부가 기술되었다.

베이킹 처리(혹은 응력제거풀림)를 실시하는 목적은 비조질강 단조품 내에 존재하는 잔류 응력을 제거하기 위해서이다. 즉, 볼트성형전의 직선 교정과 볼트 압조시에 축부에 가해지는 가공 잔류응력 때문에 저하되는 항복점을 향상시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 응력제거풀림 조건에 의해서 냉간 단조품의 항복점, 인장강도, 연신율 등이 변화하므로 용도에 맞는 적정조건을 선택하여야 한다. 이에 따라 응력제거풀림 처리온도를 각각 200, 300, 400, 500℃로 변화시킨 조건에서 3.5 시간 동안 유지함으로써 베이킹 처리를 실시한 후 처리온도에 따른 기계적 특성의 변화를 평가하였다.

2.2.1 비조질강의 인장강도 특성 평가

Fig. 1은 비조질강의 응력제거풀림처리 온도에 따른 각각 샘플의 인장강도 특성을 나타낸 것으로 현 양산소재(조질강)의 인장변위가 최저80kg/mm²에서 최고120kg/mm² 까지임을 감안한다면 조질강의 80kg/mm² 급과 비슷하거나 약간 높은 수준의 인장강도를 보여주고 있다. 응력제거풀림처리 온도를 높임에 따라 강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있으며 두 강종 모두 300℃에서 가장 높은 인장강도를 나타내고 있다. 두 강종 모두 인장강도의 증가율은 300℃에서 약 5% 정도임을 확인할 수 있었으며, 산포 역시 0.5에서 1.5 수준으로 안정된 수준으로 평가되었다.

따라서 비조질강 소재를 사용한 제품의 강도증가가 필요할 경우 베이킹처리를 이용하여 약 5% 정도의 향상을 기대할 수 있으며 이 때 적정한 온도는 300℃임을 확인할 수 있었다.

**Fig. 1 Tensile strength of micro-alloyed steels with the variation of baking temperature**

2.2.2 비조질강의 항복강도 특성 평가

Fig. 2는 비조질강의 응력제거풀림처리 온도에 따른 각각 샘플의 항복강도 특성을 나타낸 것으로 인장강도와 유사한 현상을 보이고 있으며 300~400℃까지 증가하다 감소 현상을 나타내고 있고 이때 항복비(YS/TS)는 80%대에서 90%대로 증가현상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 최대 항복비는 93%대까지 증가하고 있다.

2.2.3 비조질강의 경도 특성 평가

Fig. 3은 두가지 비조질강에 대해 베이킹처리 온도를 변화시킨에 따라 경도의 변화를 측정한 결과이다. SHCW80L강은 300℃에서 SHCW90L강은 400℃에서 가장 높은 경도값을 가지는 것을 확인할 수 있었으나 전반적으로 인장시험 결과와 유사한 경향으로 판단된다.

단조 성형시 단조품내의 위치에 따라 가공경화량의 차이가 존재하며 이에 따라 부위별 경도의 차가 발생한다. 부위별 경도의 차이는 제품의 내구성에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 관리가 필요하다. Fig. 4는 SHCW80L에 대한 심부와 표면부의 경도차이를 평가한 결과이다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 단조후 표면부와 심부의 경도 차이가 존재함을 확인할 수 있다. 또한, 베이킹 처리를 실시할 경우에도 단조품의 경도는 1%에서 10%정도의 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 모든 경우에서 표면부는 심부에 비해 HV10~30정도로 높은 값을 가지는데 이는 Guide rod pin의 냉간 단조시 표면부에 가공경화가 더 크게 발생함에 기인하는 것으로 판단된다. 300℃에서 경도편차가 적게 나타낼 수 있는데 이 때의 경도 산포는 기존 양산소재의 조질 열처리후와 비슷한 수준의 경도 산포임을 알 수 있다.

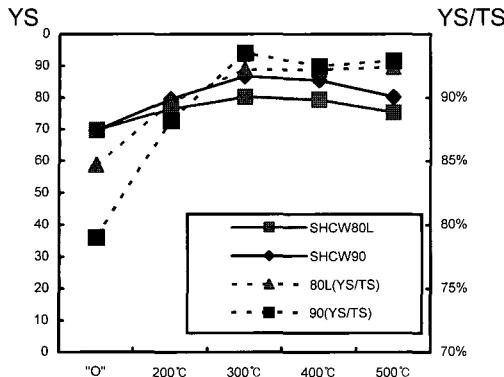


Fig. 2 Yield strength of micro-alloyed steels with the variation of baking temperature

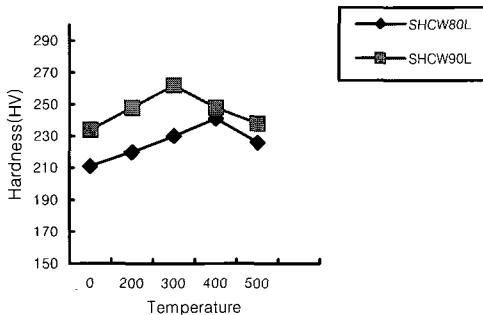


Fig. 3 Hardness variation of micro-alloyed steels according to baking temperature

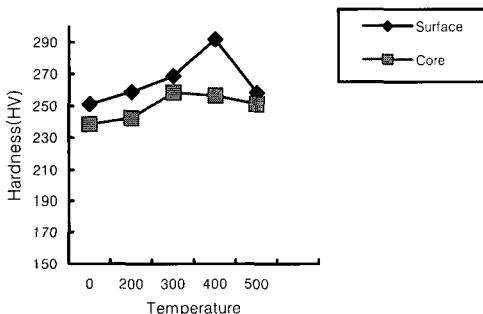


Fig. 4 Effect of strain accumulation after baking treatment in terms of testing location.

Fig. 5는 가공 경화량의 차이에 따라서 경도분포를 확인하기 위하여 단면감소율이 적은 부위의 경도와 가장 큰 부위의 경도를 비교한 결과이다. 단면감소율에 따라 경도 값이 HV50~80정도의 편차를 보이고 있으며, 변형량이 적은 쪽 단면감소

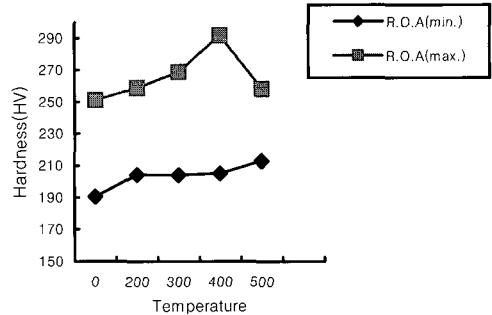


Fig. 5 Effect of strain accumulation after baking treatment

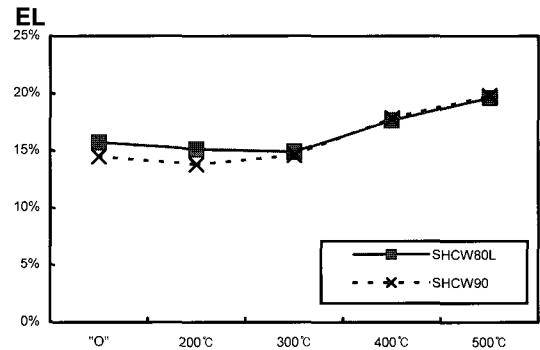


Fig. 6 Elongation of micro-alloyed steels according to baking temperature

율이 적은 쪽 부위의 경도는 예상했던 대로 변화가 그리 크지 않으며 가공 경화량이 큰 부위의 경도변화가 매우 커짐을 알 수 있었다.

비조질강의 적용시 양산에 사용되는 기존 조질강에 비해 가공경화이 최종 단조품의 물성에 많은 영향을 미치며 이에 대한 제어가 상당히 어려운 특징이 있음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 비조질강 단조품의 경우 형상에 따라 가공경화의 배분을 단조 설계시 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

2.2.4 비조질강의 연신을 특성 평가

Fig. 6은 비조질강의 응력제거풀림처리 온도에 따른 샘플의 연신을 변화를 나타낸 것으로 300°C 까지는 변화가 없으나 이후 점차 증가 현상을 보이고 있다. 결과적으로 강도, 경도가 최고점에 달하는 300~400°C 구간과 동일하므로 이 온도에서의 응력제거풀림 열처리시 비조질강을 양산제품에 적용할 수 있는 수준의 양호한 기계적 특성을 얻

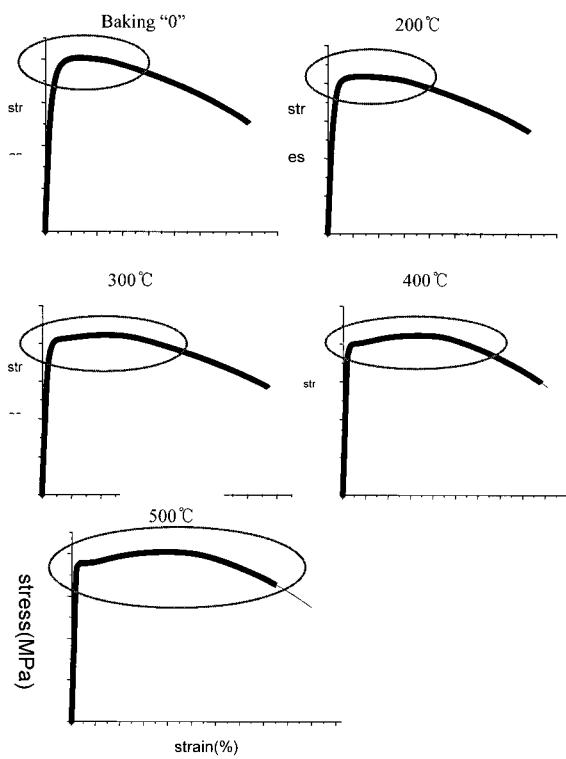


Fig. 7 Stress-strain curves of SHCW80L according to temperature

을 수 있음을 확인할 수 있다.

2.2.5 비조질강의 인장곡선 특성 평가

이상의 결과는 Guide rod pin의 최종 제품 상태에서 평가한 결과로 현상학적으로 비조질강을 양산에 적용할 경우 기계적 물성을 향상시킬 수 있는 방법을 확인할 수 있었다. 하지만, 이상의 강도, 경도, 연신율이 모두 300~400°C의 온도 영역에서 향상되는 근본적인 원인에 대한 고찰은 불가능하였다. 이상의 문제를 해결하기 위하여 Guide rod pin을 단조상태 및 온도를 변화시키며 베이킹 처리를 실시한 후 표침길이 25mm, 직경 6mm의 표준 인장시험으로 가공한 후 0.001/s의 초기 변형속도로 인장시험을 수행한 후 인장곡선의 변화 양상으로 고찰하였다.

Fig. 7, 8에서 보는 바와 같이 응력제거풀림처리(베이킹처리)를 하지 않은 시편의 경우 1~2%의 연신율 구간에서 최대강도를 나타낸 후 네킹이 발생하는 현상을 보이지만 응력제거 풀림 처리를

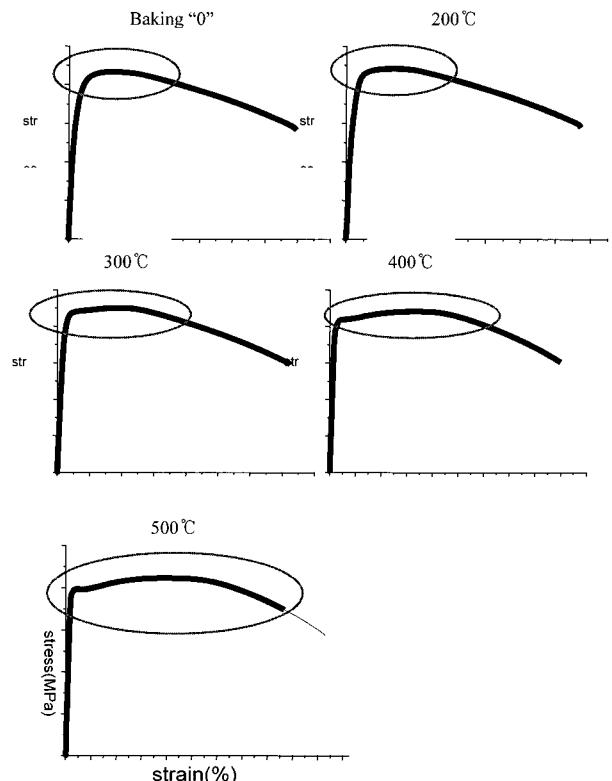


Fig. 8 Stress-strain curves of SHCW90 according to temperature

한 시편의 경우는 온도가 증가함에 따라 네킹의 발생이 사라지며 300°C 이상의 온도에서는 가공경화 및 항복점 연신 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 또한, 항복강도 및 인장강도도 연신율과 마찬가지로 베이킹 처리 온도의 증가에 따라 300~400°C의 범위까지는 향상되는 양상을 나타냄을 확인할 수 있었다.

이상에서 확인한 바와 같이 항복강도의 증가 및 연신율의 향상은 베이킹 처리 시편의 피로수명 증가에 매우 중요한 향상을 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 베이킹 처리를 하지 않은 시편의 경우 Fig. 7, 8에 나타낸 바와 같이 낮은 항복강도와 낮은 연신후의 네킹 현상으로 인해 피로수명이 전반적으로 낮게 나타나는 것을 예상 할 수 있다. 이에 반해 항복강도가 높아짐에 따라 높은 응력진폭을 가지는 구역에서 피로특성의 향상이 기대되며 가공 경화 구간의 존재로 고주기 피로 특성이 향상될 수 있다.

일반적으로 이러한 풀림 열처리 후 발생하는

강도 및 항복점의 변화는 일반적인 탄소함유강의 변형에서 관찰되는 변형시효(strain aging)와 관련이 있을 것으로 판단된다.

변형시효 현상은 기지내에 고용되어 있는 탄소나 질소와 같은 침입형 원소(interstitial atom)들이 전위(dislocation)와 반응에 기인한다. 즉, 탄소강의 인장시험 시 변형 초기에 항복점 현상(yielding phenomenon)이 발생하는데 이는 전위가 탄소나 질소 분위기에서 벗어나면서 발생하는 현상이다. 일반강의 경우 항복점 연신 중 인장곡선에는 serrated flow가 관찰되며 일단 침입형 원소들을 벗어난 전위는 더 이상 serrated flow가 없이 연속적인 인장곡선이 나타난다. 본 연구에서와 같이 낮은 온도에서 시효를 하고 다시 변형을 할 경우 탄소와 질소 같은 침입형 원소들이 시스템의 에너지를 낮추기 위해 전위쪽으로 확산하여 전위들의 이동을 방해한다. 시효 온도가 높아질수록 침입형 원소의 확산 속도 및 확산량은 높아질 수 있다. 침입형 원소들에 의해 전위의 운동이 제한을 받기 때문에 강도의 증가가 발생할 수 있다. 하지만 시효 온도를 너무 높일 경우 시스템의 전위량의 감소가 발생하여 변형 시효의 효과가 감소하게 되며 이는 강도의 증가가 감소하는 경향을 보여 줄 수 있다.

본 연구에 사용한 비조질강의 경우 기존 조질강에 비해 탄소의 함량이 낮으나 변형시효를 일으키기에 충분한 탄소 농도를 가지고 있다고 판단된다. 또한, Fig. 3~5에서 확인할 수 있었던 단조품내의 가공경화량 차이에 따라 베이킹처리가 다른 경향을 나타내는 원인은 부위에 따라 전위밀도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

현재까지 연구결과에서는 강도 및 경도의 분포가 가공경화량의 차이에 관계없이 동일한 수준까지 제어할 수는 없었지만 기존 조질강에 근접하는 수준으로 제어할 수 있는 변수를 찾을 수 있었다. 향후 Guide rod pin을 비롯한 냉간 단조품의 최종 상태에서 변형율을 효과적으로 제어함과 동시에 변형시효현상을 적절히 이용할 경우 비조질강 냉간 단조품의 기계적 특성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2.2.6 비조질강과 조질강의 기계적특성 비교

표 3에서 보는 바와 같이 비조질강 SHCW90(300°C 베이킹 처리)제품의 인장 특성은 조질강 대비 인장강도 및 강도산포 측면에서 떨어지는

Table 3 Comparison of tensile propertice between micro-alloyed and conventional quenched /tempered steels

Variation	T.S. (Kg/ ㎟)	T.S. Variation	Y.S. (Kg/ ㎟)	YS/TS
Micro-alloyed steels(SHCW90,baked at 300 °C)	92.6	Max. 1.4	86.6	93.5%
Quenching/tempered steel(9T)	98	Max. 0.8	80.3	81.9%

<Micro-alloyed steel : SHCW90(300 °C Baking)>

<Alloyed steel : SCM435(9T Grade Q/T treatment)>

현상을 보이고 있으나 이는 본 연구에서 사용된 Guide rod-pin제품의 경우 사용 가능한 범위내에 있으므로 사용상 문제점은 없을 것으로 판단된다. 하지만 비조질강을 적용할 경우 일반강의 조질처리시 발생하는 열변형 방지에 따른 후 가공 공정 생략, 불량 폐기품 절감 및 열처리 생략 등으로 제조 원가를 10%~25% 절감할 수 있으며 부가적으로 자원사용의 절감에 따른 청정효과를 얻을 수 있다. 비조질강의 적용시 기존 조질강에 비해 강도의 산포가 높아지는 현상에 대해서는 사용초기 집중적인 관리가 요구되며 제품 개발시 목표 산포 수준을 결정할 필요가 있다. 또한, 비조질강 제품의 경우 항복비가 조질강에 비해 떨어지는 단점을 가지고 있기 때문에 비조질강의 주요 생산 목표인 화스너 제품의 적용에 장애물로 작용 할 수 있다. 하지만 비조질강 성형후 베이킹 처리를 실시한 경우 표 3에 나타낸 것과 같이 항복비가 93%수준으로 향상되어 소성 체결용 제품으로도 활용이 충분히 가능한 수준임을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 냉간 단조품의 제조시 조질강을 대체하기 위하여 개발된 냉간단조용 비조질강의 응력제거풀림 열처리 온도의 변화에 따른 기계적 특성의 변화를 인장시험을 통해 평가하였으며 그 원인을 고찰하였다. 비조질강 냉간 단조후 응력제거풀림 열처리를 실시함에 따라 아래와 같은 결과를 확인할 수 있었다.

베이킹 온도에 따른 비조질강 기계적 특성

- (1) 인장강도는 300~400°C의 온도에서 최대 5% 정도의 강도 증가하였다.
- (2) 항복강도도 인장강도와 유사한 경향을 나타내며 항복비는 상온의 80%에서 300~400°C에서 베이킹 처리를 실시한 후 90%대로 증가하였다.
- (3) 경도도 인장 및 항복강도와 유사한 경향을 보였으며 단조변형량이 큰 부위에서 베이킹 처리 후 증가폭이 커짐을 확인할 수 있었다.
- (4) 연신율은 400°C부터 증가하며 온도 증가에 따라 계속 증가하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과에서 냉간단조용 비조질강 제품에 대하여 적정 온도에서의 응력제거풀림 열처리는 강도 및 연신율의 증대로 제품의 물성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 가공경화량에

따른 경도 산포를 안정화 하는 것은 응력제거풀림 열처리로서는 한계가 있으므로 단조 공정 설계시 우선적으로 고려되어야 할 부분으로 판단된다.

참 고 문 현

- [1] 이덕락, 2002, 비조질강의 개발 동향, 한국소성 가공학회지, Vol.11, pp. 388~393.
- [2] 이승현 외, 2004, 비조질강의 냉간 성형공정에 따른 성형하중 및 금형응력 해석, 한국소성가 공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 405~408.
- [3] 서동우 외, 2004, 냉간단조용 비조질강 및 성형 품의 미세조직과 기계적 특성 분석, 한국소성 가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 409~412.