

중탄소 고망간강의 합금원소와 열처리 조건이 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향

이동수 · 박현균[†]

한국산업기술대학교 신소재공학과

Effect of Alloying Elements and Heat Treatment on the Microstructures and Mechanical Properties of Medium Carbon High Manganese Steels

D. S. Lee and H. G. Park[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Korea

Abstract Mechanical properties and microstructures of medium carbon high manganese steels were investigated in terms of alloying elements such as Mn, C contents, and heat treatment condition. Austenite volume fraction was increased with increasing Mn content, leading to hardness decrease in the range of Mn content of above 10% after quenching and tempering. Such results are also supported by microstructural analysis and X-ray diffraction in that the increase in manganese content results in the increase in austenite fraction. Studies on tempering condition indicated that not only hardness and tensile strength but also Charpy impact values were reduced as tempering temperature were raised in the range of 250°C to 600°C. It was also observed that fracture mode was changed from dimple to intergranular fracture. Such results are thought to be due to very fine carbide precipitation or impurity segregation at grain boundaries as tempering temperature goes up. Heat treatment of Fe-5Mn-2Si-1Al-0.4C can be optimized by austenitizing at 850°C, air cooling and tempering at 250°C, resulting in 1950 MPa in Tensile strength, 17% in elongation and 23.3 J/cm² in Charpy impact energy with high work hardening characteristics.

(Received September 27, 2010; Revised October 18, 2010; Accepted November 15, 2010)

Key Words : Medium carbon manganese steel, austenite fraction, heat treatment, fracture mode

1. 서 론

건설기계부품 중의 하나인 유압브레이커 치즐은 사용 환경이 가혹함에 따라 일반 기계 부품 보다는 높은 내마모성, 고강도 및 내 충격성을 가진 재료를 요구하고 있지만 국내에서 사용되는 소재는 SCM440과 같은 범용기계구조용소재가 사용되고 있다. 따라서 사용 중 타격부위의 파손 및 치즐 목 부위의 절손과 같은 품질적인 문제와 낮은 소입깊이로 인한 짧은 수명을 단점으로 가지고 있다. 해외 및 국내에서는 이러한 단점을 보완하기 위해서 비교적 저가인 Mn을 다량 함유한 망간계 전용 소재에 대한 연구가 많이 행해지고 있다[1, 2]. Hadfield 강으로 대표되는 고탄소 고망간강은 탄소가 1.0~1.4%, 망간이 10~14% 정도 함유된 내마모강

으로서 가공경화성, 인성 등의 우수한 성질을 가지고 있으나, 압연재와 같은 성형상태에서는 입계에 탄화물이 석출하여 기계적 성질이 저하하므로 균질화처리 후 수인처리(water toughening)를 행하여 사용하고 있으나 수인처리를 한 경우라도 제조과정에서나 사용 중의 마찰에 의해서 약 260°C 이상으로 가열되면 입계 및 입내에 탄화물이 석출되어 기계적 성질이 저하하므로 기계부품에의 사용이 제한되고 있다. Mn 함량을 15~30% 수준으로 올리면서 탄소를 거의 함유하지 않은 저탄소 고망간강(TRIP 또는 TWIP 강)은 연신율이 95%에 이를 정도로 성형성이 우수하고 가공경화성도 우수하나 인장강도가 65 Kg/mm² 수준 이어서 자동차 외판용 소재로서는 아주 우수하나 유압브레이커 치즐 소재로는 강도가 부족한 수준이다. 따라서 망간강이 갖는 고유한 높은 가공경화성에 기

[†]E-mail : yama1879@kpu.ac.kr

인한 우수한 내마모성과 동일강도수준에서의 높은 연신율이나 인성, 그리고 필요한 강도수준을 얻기 위해서는 탄소함량을 중탄소(0.3~0.8 wt%) 수준으로 올리면서 망간강의 우수한 특성을 구현할 수 있는 중탄소 고망간강의 개발에 많은 관심이 집중되고 있으며 보다 높은 인성을 갖기 위한 합금원소를 첨가한 소재의 연구가 많이 행해지고 있다[3-5]. 본 연구에서는 Mn, Si 및 Al을 첨가한 마르텐사이트 조직의 중탄소 고망간강을 제조하여 유압브레이커와 같이 고강도 고인성이 필요한 분야의 소재 개발을 위한 연구를 진행하였다. 합금원소의 첨가량은 충분한 내마모성과 고강도를 얻기 위하여 중탄소 범위 0.3~0.5 wt%의 C를 첨가시키고, 인장강도와 기지인성을 증가시키기 위하여 Si는 2 wt%, Al은 1 wt% 첨가시켰다. Al은 결정립을 미세화 시켜 충격값을 증가시키는 원소로서 1w% 이상 첨가한 경우, 인장강도는 감소되지만 결정립 미세화로 충격값은 증가되는 것으로 보고하였다[6]. 또한 Si도 C와 복합적인 상호관계로 결정립 미세화에 영향이 있다고 밝히고 있다[7]. 따라서 마르텐사이트계 중탄소 고망간강의 이러한 특성을 이용하여 유압브레이커 치즐 전용소재의 제조 가능성에 대한 기초자료를 얻고자 본 연구를 행하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편제작 및 열처리

중탄소 고망간강에서 합금원소인 C, Mn 함량에 따른 기본적인 고망간강의 조직과 기계적 성질을 파악하고자, 순 Fe, Mn, Si, Al 및 탄소원으로서 주철을 사용하여 여러 조성을 갖는 대략 5g 중량의 시편을 진공 이크 용해로(VAR)를 이용하여 Ar 분위기하에서 제조하였다. 이 후 성분 균질화를 위하여 추가로 3회 재용해하였다. 제작된 시편은 대기분위기에서 1050°C에서 1시간 유지 후에 공냉한 후 200°C에서 1시간 템퍼링하였으며 이들의 목표성분은 Table 1과 같다. 또한 용해중의 탄소손실을 우려하여 제조된 시편을 C, S 분석을 해본결과 탄소함량이 목표성분과 동일함을 확인하였다. Table 1에서 보여주는 바와 같이 A1~A5와 B1, B2는 주로 Mn 함량의 변화를 주었으며 A1, B1 및 C1은 탄소함량에

Table 1. Chemical composition of medium carbon manganese steel

| No. | Elements (wt%) | | | | |
|-----|----------------|----|----|----|------|
| | C | Mn | Si | Al | Fe |
| A1 | 0.3 | 5 | 2 | 1 | bal. |
| A2 | 0.3 | 7 | 2 | 1 | bal. |
| A3 | 0.3 | 9 | 2 | 1 | bal. |
| A4 | 0.3 | 10 | 2 | 1 | bal. |
| A5 | 0.3 | 15 | 2 | 1 | bal. |
| B1 | 0.4 | 5 | 2 | 1 | bal. |
| B2 | 0.4 | 7 | 2 | 1 | bal. |
| C1 | 0.5 | 5 | 2 | 1 | bal. |

Table 2. Chemical composition of medium carbon manganese steel

| No. | Elements (wt%) | | | | |
|-----|----------------|------|------|------|------|
| | C | Mn | Si | Al | Fe |
| B1 | 0.42 | 4.92 | 1.90 | 0.98 | bal. |

따른 특성을 관찰하기 위하여 C 함량의 변화를 주었다. 또한 Si 및 Al의 함량은 각각 2 wt% 및 1 wt%로 고정하였다. 예비시험 후 결과가 가장 우수한 특성을 보인 B1 조성에 대해서는 진공 유도 용해(VIM)를 이용하여 slab 형태의 25 kg의 잉고트를 제조하였으며 화학 성분을 분석한 결과를 Table 2에서 보여주고 있다. 제작된 판재형의 잉고트는 두께 70 mm로 15 mm두께까지 1200°C로 열간압연 하였는데 제조된 판재의 기계가공성이 좋지 않아 가공성 향상을 위하여 구상화 열처리를 하였으며 열처리 조건은 1050°C에서 60 min 유지 후 공냉하고 다시 700°C에서 12 h 유지 후 로냉하였다. 이런 공정을 거친 판재로부터 KS규격인 3 mm 두께의 13B 인장 시편과 표준 사르피 V-notch 충격시편을 제작하였다. 템퍼링온도에 따른 기계적인 평가를 하기 위하여 Table 3과 같이 템퍼링 온도에 변화를 주어 열처리 하였으며 열처리한 인장시편과 충격시편은 시험 전 다시 2000번 연마지로 산화된 표면을 깨끗이 연마하였다.

2.2 기계적 성질시험

열처리 조건에 따른 기계적 특성을 평가하기 위하여 로크웰 경도 시험기를 사용하여 경도값을 측정하

Table 3. Heat treatment conditions for tempering temperature.

| Austenitizing Temperature (°C) | Tempering Temperature (°C) |
|--------------------------------|----------------------------|
| 850 | 200 |
| | 250 |
| | 450 |
| | 600 |

Austenitizing and tempering holding time are 1hour, respectively

였으며, 상온에서 V-notch 샤르피 충격시편으로 충격시험을 실시하였다. 또한 인장 시험하여 인장강도, 연신율을 측정하였다.

2.3 상 및 미세조직 분석

합금성분에 따른 상변화를 관찰하기 위하여 X-ray 회절 분석을 실시하였으며, 열처리조건에 따른 미세조직, 기계적 특성 그리고 파단거동의 변화를 알아보기 위하여 샤르피 충격시험 후 파단된 충격 시험편의 한쪽을 반을 절단하여 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 파단 현상을 알아보기 위하여 시험편의 파단부는 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 합금원소에 따른 중탄소 고망간강의 미세조직과 경도

유압브레이커용 치즐 전용소재로 사용하기 위해서는 충분한 경화능과 내마모성을 가져야 한다. 본 연구에서 오스테나이트 안정화원소인 C과 Mn을 다량

첨가한 중탄소 고망간강은 용체화처리 후 공냉 시에도 오스테나이트조직을 가지게 되기 쉽다. 현재 합금강의 Ms와 Md를 예측하는 계산식은 많이 발표되었지만 이는 저합금강을 기초로 만들어진 예측식들이기 때문에 본 연구에서처럼 다량의 Mn을 첨가한 합금강에서는 정확도면에서 신뢰성이 떨어져 사용할 수 없다. 따라서 C과 Mn 함량을 조절하여 Table 1과 같은 합금원소를 첨가된 시편을 제조 후, 동일한 조건에서 열처리하여 미세조직 및 경도값의 변화를 관찰하였다.

C함량이 0.3 wt%인 A1~A5인 시편을 대상으로 Mn 함량을 증가시켜 그에 따른 미세조직을 관찰한 Fig. 1은 오스테나이트 안정화 원소인 Mn 함량이 증가함에 따라 조직 내 오스테나이트 분율이 증가하는 것을 보여주고 있다. 특히 Fig. 1(c)는 Mn 함량이 15 wt%로 조직 내 템퍼드 마르텐사이트 조직과 오스테나이트 조직이 비슷한 분율로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 좀 더 명확한 상분석을 위한 XRD 패턴인 Fig. 2를 보면 망간함량이 증가함에 따라 abcc(bcc-martensite)의 회절강도는 감소한 반면 γ fcc(austenite)의 회절강도는 뚜렷이 증가하였다. 이외 다른 시편들(B1, B2 및 C1)은 오스테나이트 안정화원소인 C과 Mn의 첨가에 의해 상온에서 오스테나이트상이 안정화될 수준은 아니나 경화능 증가로 말미암아 공냉시에도 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 한편, 중탄소 고망간강에서 Mn와 C함량에 따른 경도측정 결과인 Fig. 3에서 보면 동일 C함량에서 Mn함량을 조절한 A1~A5의 조성은 Mn함량이 증가함에 따라 오스테나이트의 분율이 증가하여 경도값이 감소함을 알 수 있고, 동일 Mn 함량에서 C함량이 증가함에 따라 경도값은 0.4w%까지는 증가하

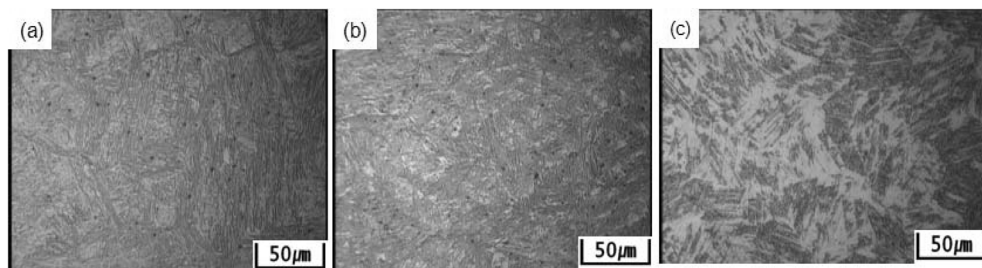


Fig. 1. Change of microstructure with a variety of Mn content (a) A1 : Fe-5Mn-2Si-1Al-0.3C (b) A4 : Fe-10Mn-2Si-1Al-0.3C (c) A5 : Fe-15Mn-2Si-1Al-0.3C.

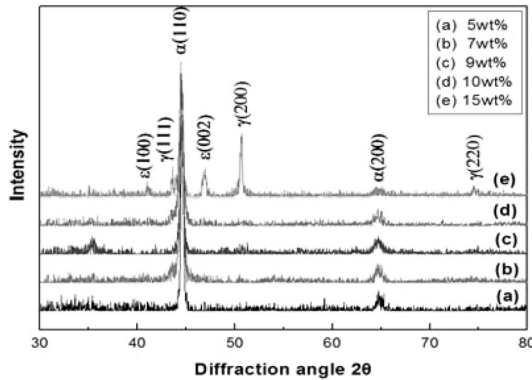


Fig. 2. Change in X-ray patterns with Mn content.

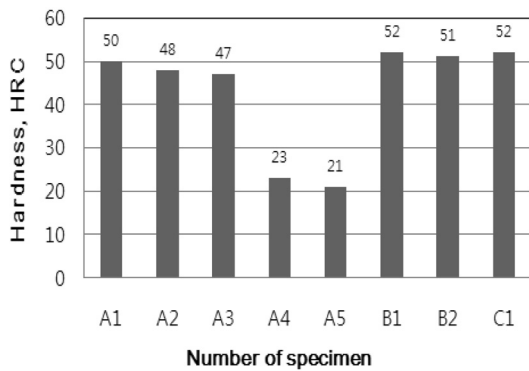


Fig. 3. Hardness of specimen with various composition of C and Mn content after quenching and tempering.

였지만 0.5 w% 첨가 시 경도는 상승하지 않았는데 이는 잔류오스테나이트의 증가로 C 함량증가에 의한 마르텐사이트 강도의 증가효과가 상쇄되기 때문으로

생각된다.

현재 유압브레이커 치즐에 사용되고 있는 범용기계 구조용강인 SCM440의 기계적 특성은 Table 4와 같다. SCM440의 기계적 특성과 비교하여 B2시편의 경우, 경도는 만족할만한 수준이지만 Mn의 함량이 7%의 많은 Mn함량이 첨가되어 쿨링 균열이나 균열을 유발시키므로 유압브레이커 치즐의 소재의 기계적 성질에 만족할만하다고 판단되는 B1소재를 선택하여 템퍼링 온도를 변화를 주어 열처리를 행하였다. B1 조성의 Ms 온도를 식 (1)를 통하여 계산해보면 167°C이다[8].

$$Ms(^{\circ}C) = 525 - 350(C - 0.005) - 45Mn - 5Si + 15Al \quad (1)$$

3.2 열처리에 따른 Fe-5Mn-2Si-1Al-4C 강의 미세조직과 기계적 특성

B1 조성의 강은 Mn첨가에 의한 경화능의 증가로 공냉시에도 마르텐사이트 조직이 관찰되었으며 tempered martensite embrittlement 온도로 알려진 300°C을 제외한 250°C, 450°C 및 600°C에서 템퍼링한 시편의 조직사진은 Fig. 4에서 보여주고 있다. 모든 템퍼링온도에서 펄퍼드 마르텐사이트 조직을 보여주고 있으며 탄화물의 형상은 관찰되지 않았다.

템퍼링 온도에 따른 기계적 특성의 변화를 Table 5에 나타내었다. 경도값의 변화를 보면 200°C 템퍼링의 경우 HRC 52 수준이며 템퍼링온도가 증가함에 따라 경도값이 감소함을 알 수 있다. 이러한 경

Table 4. Mechanical properties of SCM440 used in chisel

| | Tensile strength (kgf/mm ²) | Elongation (%) | Charpy impact energy (J/cm ²) | HRC |
|--------|---|----------------|---|-----|
| SCM440 | 135 | 15 | 25 | 45 |

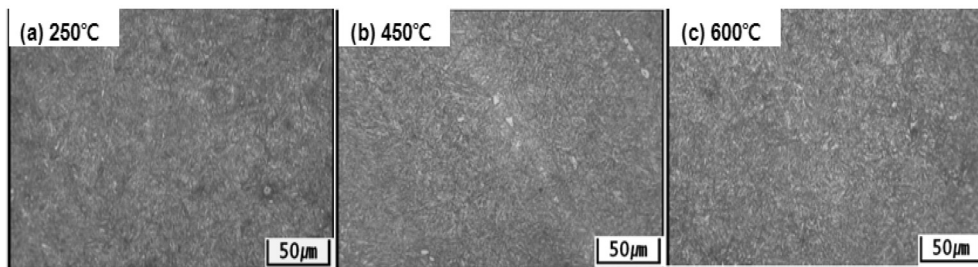
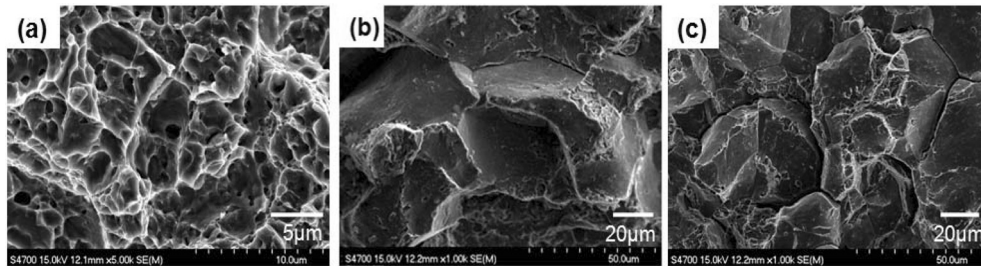


Fig. 4. Change in microstructures with tempering temperature (a) 250°C (b) 450°C (c) 600°C.

Table 5. Effects of tempering temperature on mechanical properties of Fe-5Mn-2Si-1Al-0.4C

| Tempering Temperature (°C) | Tensile strength (kgf/mm ²) | Elongation (%) | Charpy impact energy (J/cm ²) | HRC |
|----------------------------|---|----------------|---|-----|
| 200 | | | 12 | 52 |
| 250 | 199 | 17 | 23.3 | 52 |
| 450 | | | 2.5 | 46 |
| 600 | 149 | 10 | 8.6 | 40 |

**Fig. 5.** SEM Fractographs of B1 specimens for which Charpy impact test were done at various tempering temperature (°C) : (a) 250 (b) 450 (c) 600.

향은 인장강도 값의 변화와도 잘 일치한다. 250°C 템퍼링의 경우 199 Kg/mm²의 인장강도 값을 보인 반면 600°C 템퍼링의 경우에는 149 Kg/mm²의 인장강도 값을 보이고 있다. 이러한 강도 수준은 현재 사용되고 있는 SCM440에서 얻을 수 있는 강도 값보다 높은 수준이다. 그러나 템퍼링온도에 따른 충격값의 변화를 보면 250°C 템퍼링조건을 정점으로 하여 템퍼링온도가 증가함에 따라 충격값이 감소함을 알 수 있다. 특히 450°C 템퍼링 조건에서 충격값이 현저하게 감소하였는데, 이는 샤르피 충격시험 후 파단 부를 보여주고 있는 Fig. 5의 파면 형태에 의해서도 잘 뒷받침된다. 템퍼링 온도 250°C인 시편의 파단부는 연성파괴인 Dimple 형태의 파면이 관찰되는 반면에 450°C와 600°C에서 템퍼링한 시편의 파단부는 전형적인 입계 파단의 모습을 보이고 있다. 이러한 현상은 250°C 템퍼링 조건인 Fig. 5(a)는 낮은 템퍼링 온도 때문에 결정입계에 탄화물의 석출이 거의 없어 결정입계 취성파괴의 발생이 비교적 어렵게 되므로 파괴 양상은 기지 인성에 의한 Dimple 파괴양상이 관찰된 것으로 추정된다. 반면에 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 결정입계 파괴양상이 뚜렷이 관찰되었는데 이러한 결정입계 파단양상은 주로 템퍼링 하는 동안 결정입계에 조대한 탄화물이

나 불순물이 물론 입계에 조대한 탄화물의 존재여부에도 기인될 수 있지만 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)에서 보여주는 것과 같이 조대한 탄화물은 관찰되지 않았다. 따라서 400°C와 450°C 템퍼링 조건의 파괴양상은 템퍼링 하는 동안 전자현미경으로 관찰되지 않을 정도의 미세 탄화물의 입계석출이나 불순물의 입계편석에 의한 결정립계취화에 의한 결정입계 파단 양상이 관찰된 것으로 생각되며 이러한 파단 거동은 Fe-8Mn 강[10]과 2Si-0.4C 강[11]에서 보고된 바가 있다. 한편 B1 조성의 소재에 대하여 가공경화성을 조사하기 위하여 템퍼링온도 250°C에서 템퍼링 후 인장시험하여 얻어진 Strain-Stress curve를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 항복강도는 500 Mpa인데 반해 인장강도는 1950 Mpa으로 항복강도 이후 급격하게 가공경화 현상이 일어나는 것을 볼 수 있으며 이러한 결과는 국부적인 반복하중을 받는 유압브레이커 치즐에 약간의 마모가 일어나면 마모된 부위의 경도 증가로 인해 급격히 내마모성이 향상됨을 의미한다. 지금까지의 실험결과에 기반하여 판단해보면 마르텐사이트계 Fe-5Mn-2Si-1Al-0.4C강은 본 연구의 열처리 조건 중에 하나인 용체화처리온도 850°C, 템퍼링온도 250°C에서 건설기계부품용 전용소재인 SCM440보다 전체적으로 높

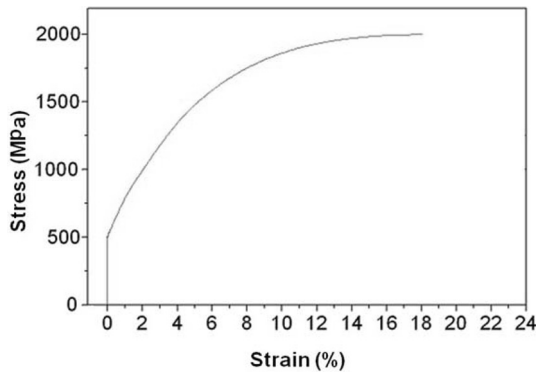


Fig. 6. Flow curve of B1 specimen after austenitizing at 850°C, followed by tempering at 250°C.

은 기계적 특성을 나타내었지만 충격값은 비슷한 결과를 나타내었다. 따라서 고망간강의 높은 가공경화성과 경화능을 바탕으로 유압브레이커 치질의 전용소재로 사용하기 위한 열처리 방법과 첨가 합금원소의 연구가 보다 진행된다면 좀 더 낮은 가격으로 좋은 품질의 유압브레이커 치질의 전용소재가 개발될 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마르텐사이트 계 중탄소 고망간강의 C과 Mn 함량변화에 따른 기계적 특성, 미세조직 그리고 열처리 특성 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 중탄소 고망간강에서 Mn 함량이 10% 이상으로 증가하면 오스테나이트 안정화에 의한 잔류 오스테나이트의 영향으로 경도가 감소하기 시작하며 이러한 경향은 템퍼드 마르텐사이트 + 오스테나이트 혼합조직에서 탄소함량 증가에 의한 마르텐사이트 경도 증가효과를 상쇄한다.
2. Fe-5Mn-2Si-1Al-0.4C 강은 자경성이 있는 소재이며 용체화처리 후 템퍼링온도에 따라 충격값이

크게 변화했다. 템퍼링 온도가 증가함에 따라 경도, 인장강도, 연신율의 감소뿐만 아니라 충격값도 현저하게 감소하였다. 이러한 현상은 SEM 관찰에서 파괴형태가 덩플형태에서 입계파괴형상으로 변해감을 알 수 있었으며, 이는 템퍼링 온도의 증가에 따라 입계 탄화물의 석출 또는 불순물의 입계편석에 기인한 것으로 추정된다.

3. 본 소재에 대한 최적 열처리조건은 850°C에서 용체화처리를 한 후 공냉하고 250°C에서 템퍼링하는 것으로서 인장강도 199 kgf/mm², 경도 52 HRC, 연신율 17% 및 충격값 23 J/cm²의 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있었다. 이러한 조건으로 열처리된 소재는 0.25의 낮은 항복비 및 높은 가공경화율을 보였다.

참고문헌

1. G.G. Chin, S.G. Kim, S.K. Kim and I.R. Sohn : *Tre Met. Mater. Eng.* **19**, 12 (2006).
2. B. Hutchinson, N. Ridly, *Scripta Mater.* **55** (2006) 299-302.
3. Xie Jingpei, Wang Aiqin, Yuan Hailum. [J]. *Tribotest*, 2004, (11): 151.
4. Xie jingpei, Wang Aiqin, Wang Wenyan, Li Jiwen, Li Luoli. *JOURNAL OF RARE EARTHS*, Vol, 24, Spec. Issue, Dec. 2006, p. 401].
5. P. Sahu, M. De, S., Kajiware. *Mater. Sci. Eng. A333* (2002) 10-23.
6. J.H Park, S.H. Park and I.S. Chung : *J. of the Korea Inst. of Met. & Mater* **34**(3) (1996).
7. P. Abramowitz and R. Amoll : *Metall. Trans.*, **1** (1970) 1773.
8. C. Liu, Z. Zhao, S.D. Bhole, *mater. Sci. Eng A434* (2006) 289-293.
9. R. Dendys : *Pipeline Technology Conference*, Vol. 1, Ostend, Belgium, (2004).
10. M. Nasim, B.C. Edwards, E.A. Wilson *Mater. Sci. Eng A281* (2000) 56-67.
11. H. Kwon and C.H. Kim : *Metall. Trans.*, **A**, **17A** (1986) 1173.