



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

템퍼링한 기계구조용 탄소강
SM45C의 경도 및 흡수에너지에
대한 신뢰성 평가



2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

재 료 공 학 과

구 세 훈

공 학 석 사 학 위 논 문

템퍼링한 기계구조용 탄소강
SM45C의 경도 및 흡수에너지에
대한 신뢰성 평가

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

재료공학과

구 세 훈

구세훈의 공학석사 학위논문을
인준함

2020년 2월



위원장 공학박사 김태일 (인)

위원 공학박사 김철수 (인)

위원 공학박사 남기우 (인)

목 차

Abstract	ii
1. 서론	1
2. 재료 및 실험방법	2
2.1 재료 및 시험편	2
2.2 실험 방법	3
3. 결과 및 고찰	4
3.1 인장강도	4
3.2 로크웰경도 및 충격 흡수에너지	14
3.3 감쇠능	26
4. 결론	29
References	31

Reliability evaluation of hardness and absorbed energy of carbon steel SM45C for tempered mechanical structure

Se-Hun Gu

Department of Materials Science and Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In this study, SM45C steel(KS D3752), which is widely used for mechanical structure, was carburized at 870°C for 4 hours and tempered at 300°C and 400°C for 1, 3 and 6 hours. The tempered materials were evaluated for tensile test, hardness test, impact test and damping ability. In particular, the hardness and the absorption energy were evaluate the reliability by the Weibull statistical analysis. 300°C-1h specimen is considered to be the best heat treatment condition in the tensile stress, strain and the observation of fracture surface. 300 °C specimens showed very fine grains, and increased hardness and strength compared to the as-received specimens. 400°C specimens were slightly finer than the 300°C specimens, and formed tempered martensite and reduced strength and hardness. 300°C-1h specimen showed larger shape and scale parameter than the other specimens, and Rockwell hardness variance was small and showed the best

characteristics. 400°C-3h specimen showed larger shape and scale parameter than the other specimens, the dispersion of impact absorption energy is small, and showed excellent characteristics. The bursted surface absorbed the impact energy and showed high impact absorption energy. The damping ability of 400°C specimen was superior to that of 300°C specimen due to the formation of tempered martensite.



1. 서 론

국산 기계구조용 강의 품질은 세계 최고 수준에 이르고 있으나, 특성에 맞는 데이터가 부족하여 설계에 어려움의 따르고 있다. 일부 수요자는 국산 재료보다는 외국산 재료를 선호하는 등 국산 철강 재료에 대한 정확한 정보가 부족하다. 일본은 1970년대부터 금속재료 기술연구소에서 피로 및 크리프 특성 데이터를 작성하고 있다. 이것은 공학적인 데이터의 제공뿐만 아니라, 품질 경쟁을 유도하는 효과를 얻기도 하였다. 탄소강 SM45C(KS D3752)는 기계구조 및 금형 등에 많이 사용되는 재료이다. SM45C에 관한 연구는 이온 질화하여 반복 인장-압축의 피로 거동[1], 고주파 경화처리[2], CO₂ 레이저를 사용한 표면경화[3], 퀴칭 냉매 특성[4,5], 어닐링 최적화[6], 고온 동적 거동[7], 플라즈마 질화처리강의 마모특성[8], 용접된 강봉의 피로 거동[9], 이중재와의 마찰용접 특성[10] 등이 있다. 또한 용접된 선박구조용 강판의 기계적 및 침지특성 평가[11] 및 열처리 후의 감쇠능 평가[12] 등이 있다. 그러나 구조용 강재의 강도, 경도 등의 기계적 특성은 재료 개발의 기초 데이터로 사용하기 위해서는 통계적 특성(평균값, 분산) 및 정량적 확률분포 특성을 파악하고 평가하는 것이 매우 중요하다.[13-15]

이러한 관점에서 본 연구에서는 기계구조용 강으로 많이 사용되는 SM45C를 사용하여, 침탄 후에 2종류 온도에서 열처리(템퍼링)하였다. 열처리한 재료는 반복 사용하는 구조물을 고려하여 인장시험, 경도시험, 충격시험 및 감쇠능을 평가하였다. 특히 경도 및 충격 흡수에너지는 템퍼링 온도 및 시간에 의한 영향을 검토하기 위하여 와이블 통계해석을 실시하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

사용한 재료는 기계구조용 탄소 강재인 SM45C(KS D3752)이다. 모재 시험편은 850℃에서 90분 퀴칭한 후에 530℃에서 120분 템퍼링한 것을 사용하였다. 열처리 시험편은 모재 시험편을 870℃에서 4시간 침탄 후에 300℃ 및 400℃에서 1, 3 및 6시간 템퍼링 하였다. 인장시험편의 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타낸다. 충격시험편은 V노치 표준시험편을 사용하였다. 감쇠능 측정 시험편은 120 x 20 x 1(mm) 크기를 사용하였다.

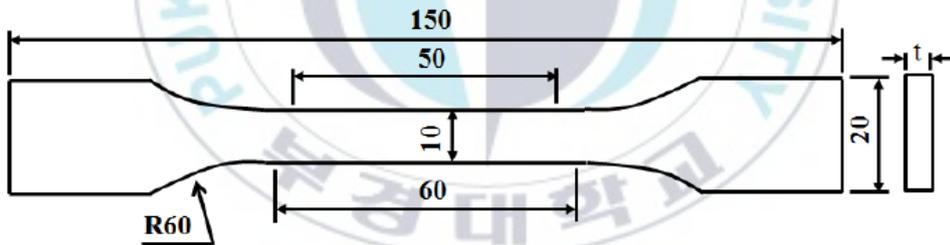


Fig. 1 Dimension and shape of tensile specimen (Unit : mm)

2.2. 실험 방법

인장시험은 대경테크에서 제작한 기계식 만능재료시험기 (DTU-900MH)를 사용하였으며, 크로스헤드 속도는 5 mm/min이었다.

경도는 재료의 특성을 간편하게 평가할 수 있다. 템퍼링한 시험편의 로크웰 경도를 각각 20회 측정하여 템퍼링에 따른 특성을 평가하였다.

충격시험은 20 kgf-m의 충격시험기를 사용하여, 각 열처리 조건에 10개의 시험편의 충격 흡수에너지를 측정하였다. 측정된 로크웰 경도와 흡수에너지는 와이블 통계 해석을 수행하였다.

템퍼링 처리한 시험편의 미세조직과 파단면은 광학현미경(GX51 ; OLYMPUS)으로 관찰하였다. 이때 미세조직은 3% 나이탈 용액으로 10초간 에칭하였다.

감쇠능은 내부마찰 측정장치(internal friction measurement machine, 진공이화학, IFT-1500)를 사용하여, 10^{-4} torr의 진공에서 대수 감쇠율을 구하였다. 측정 방법은 진동 측 전극과 검출 측 전극이 접촉되지 않게 시험편 위에 배열시킨다. 감쇠율은 시험편을 강제진동 시킨 후, 자유 감쇠가 끝날 때까지의 주파수를 측정하였다. 감쇠능은 아래 식을 사용하여 구하였다.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_n}$$

여기서, n : 파수, x_1 : 최초파의 진폭, x_n : n 번째 파의 진폭이다. 각 시험편은 5회씩 진동을 가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장강도

Fig. 2는 인장실험에서 얻어진 응력-변형률 선도이다. 300°C 및 400°C 시험편은 모재시험편보다 인장 응력은 증가하였지만, 변형률은 감소하였다. 그러나 400°C 시험편은 300°C 시험편보다 응력 및 변형률이 감소하였다. 그리고 각 온도에서 템퍼링 시간이 증가할수록 변형률은 비슷하였지만, 인장 응력은 감소하였다. 인장 응력-변형률 관계에서는 300°C-1h 시험편이 가장 우수한 열처리 조건이라 판단된다.

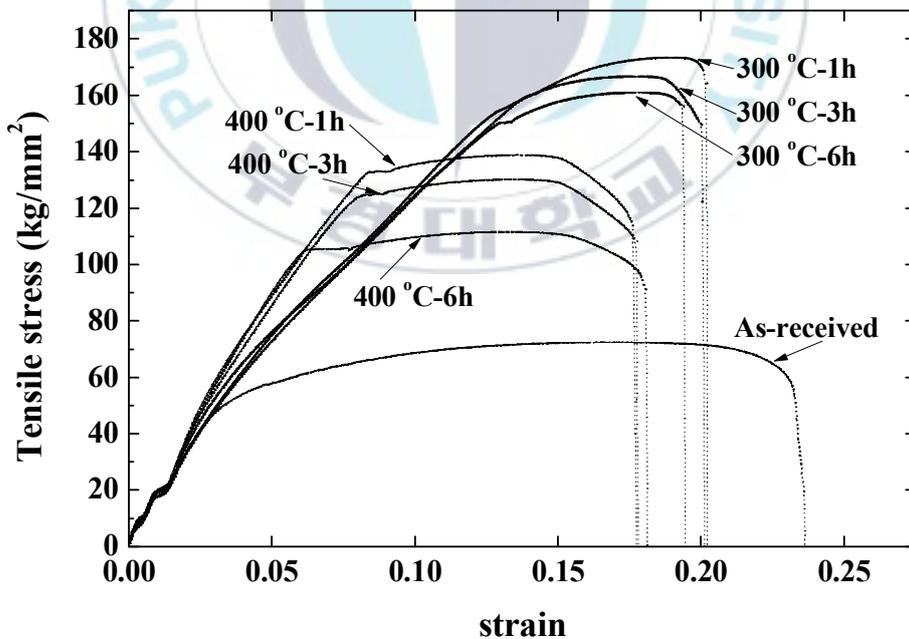


Fig. 2 Tensile stress - strain curve

Fig. 3은 평균 인장응력과 열처리 조건과의 관계를 나타낸다. 300°C 및 400°C의 모든 템퍼링 시험편은 모재시험편보다 모든 템퍼링 시간에서 응력이 증가하였지만, 각 온도에서 템퍼링 시간이 증가함에 따라서 응력은 감소하였다. 템퍼링 시험편은 모재시험편에 비교하여 300°C-1h시험편 140%, 300°C-3h시험편 118%, 300°C-6h시험편 105%, 400°C-1h시험편 87%, 400°C-3h시험편 79%, 400°C-6h시험편 50% 증가하였다.

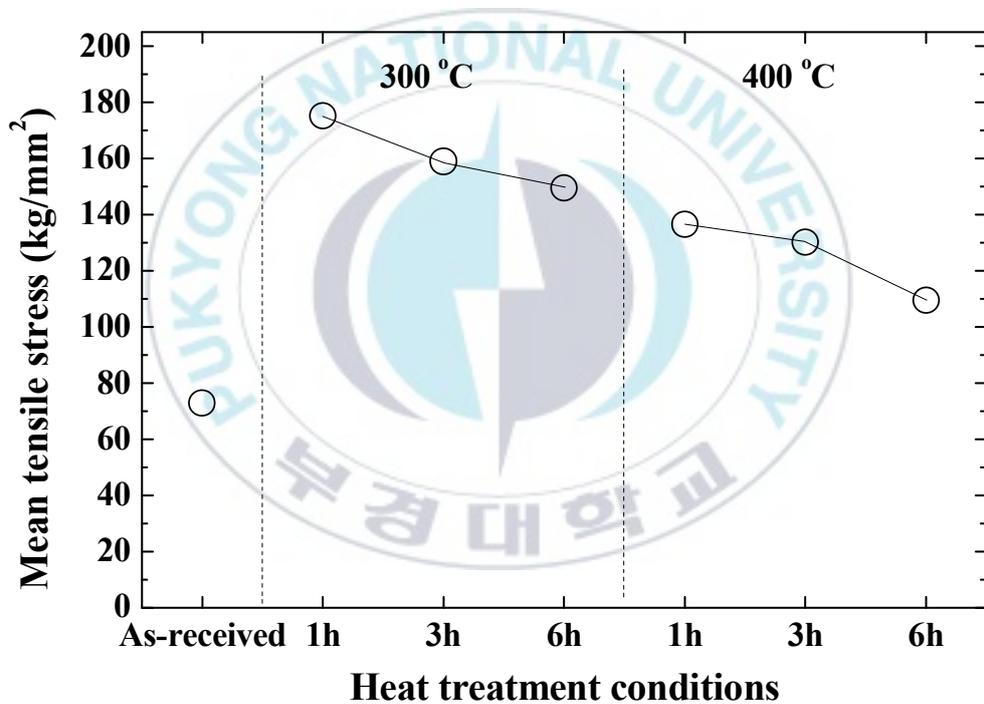


Fig. 3 Mean tensile stress according to heat treatment conditions

Fig. 4는 변형률과 열처리 조건과의 관계를 나타낸다. 300°C 및 400°C의 모든 템퍼링 시험편은 모재시험편보다 모든 시간에서 변형률이 감소하였다. 300°C 시험편은 템퍼링 시간이 증가함에 따라서 변형률은 감소하였으나, 400°C 시험편은 약간 증가하였다. 템퍼링 시험편은 모재시험편에 비교하여 300°C-1h 시험편 -14%, 300°C-3h 시험편 -14.8%, 300°C-6h 시험편 -17.7%, 400°C-1h 시험편 -25%, 400°C-3h 시험편 -24.8%, 400°C-6h 시험편 -23% 감소하였다.

Fig. 5는 평균 인장응력과 변형률과의 관계를 나타낸다. 300°C 시험편은 인장강도와 변형률의 비례관계를 나타내었으나, 400°C 시험편은 역비례 관계를 나타내었다.

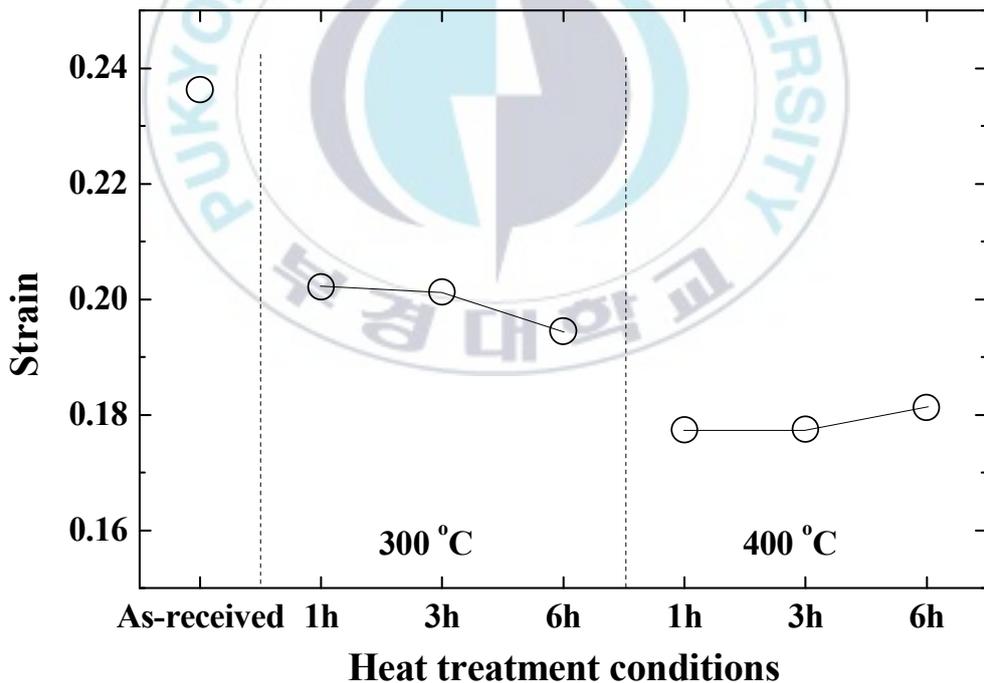


Fig. 4 Strain according to heat treatment conditions

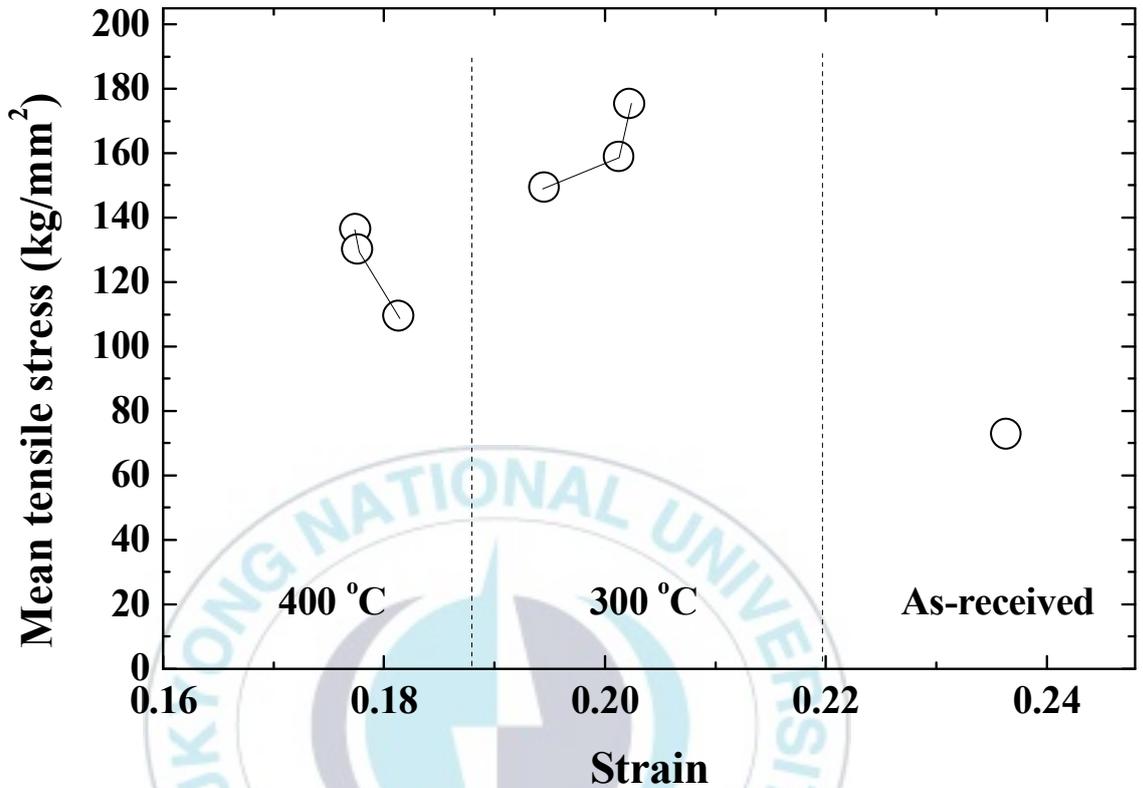
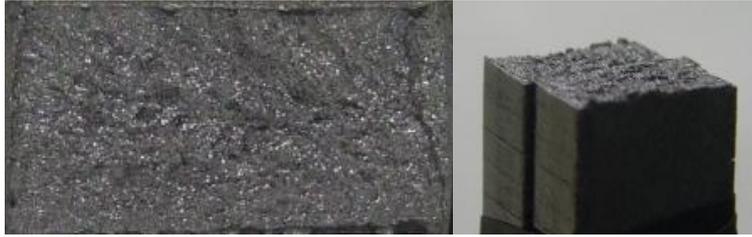


Fig. 5 Relationship of mean tensile stress and strain

Fig. 6은 인장과단면을 나타낸다. 모재시험편은 하중방향에 대하여 수직한 평탄한 파면(평면변형률)을 나타내었다. 그러나 토퍼링 온도 및 시간이 증가함에 따라서 평탄한 파면(평면변형률)에서 전단형 파면(평면응력)으로 변화하였다.



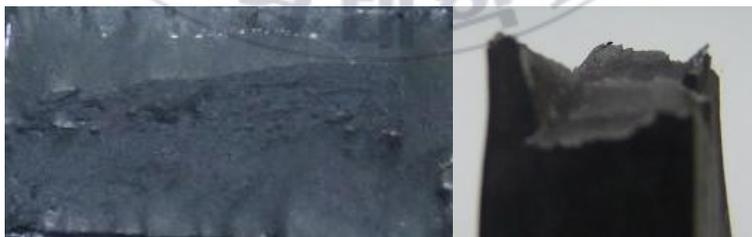
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Fig. 6 Fracture surface. (a) As-received specimen, (b) 300°C -1h specimen, (c) 300°C -3h specimen, (d) 300°C -6h specimen, (e) 400°C -1h specimen, (f) 400°C -3h specimen, (g) 400°C -6h specimen

Fig. 7은 Fig. 6의 파면에서 얻은 파면률을 나타낸다. 모재시험편은 100% 평면변형률 파면을 나타내었다. 300°C 시험편은 평면응력 파면이 나타났고, 템퍼링 시간이 길어질수록 평면응력 파면이 넓어지고, 평면변형률 파면이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 300°C에서 템퍼링 할 경우 청열취성(Temper embrittlement)에 의한 영향이라 판단된다. 300°C에서 템퍼링 시간이 길어질수록 평면응력 파면이 늘어나는 것은 시간에 따라 탈탄현상에 의하여 격자 내부에 과포화되어있던 탄소가 표면 근방부터 산소와 반응하여 이산화탄소가 되면서 격자 변형이 줄어들고, 제2상의 존재인 탄소가 빠져나가기 때문에 전위이동장벽으로써의 역할이 줄어들었을 것으로 예측된다. 400°C 템퍼링의 경우에는 청열취성 범위보다 높은 온도이므로 고온 템퍼링으로 볼 수 있다. 모든 템퍼링 시간에서 평면응력 파면이 나타났으며, 파면은 완전한 Cup&cone 형태로 400°C 템퍼링은 퀴칭으로 인하여 높아진 경도와 강도를 많이 낮출 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 높은 온도에 의한 탈탄현상으로 인하여 강도와 경도가 낮아진 것으로 예측된다. 이상과 같은 인장시험의 결과에서 300°C -1h 시험편이 최적의 기계적 특성이라 판단된다.

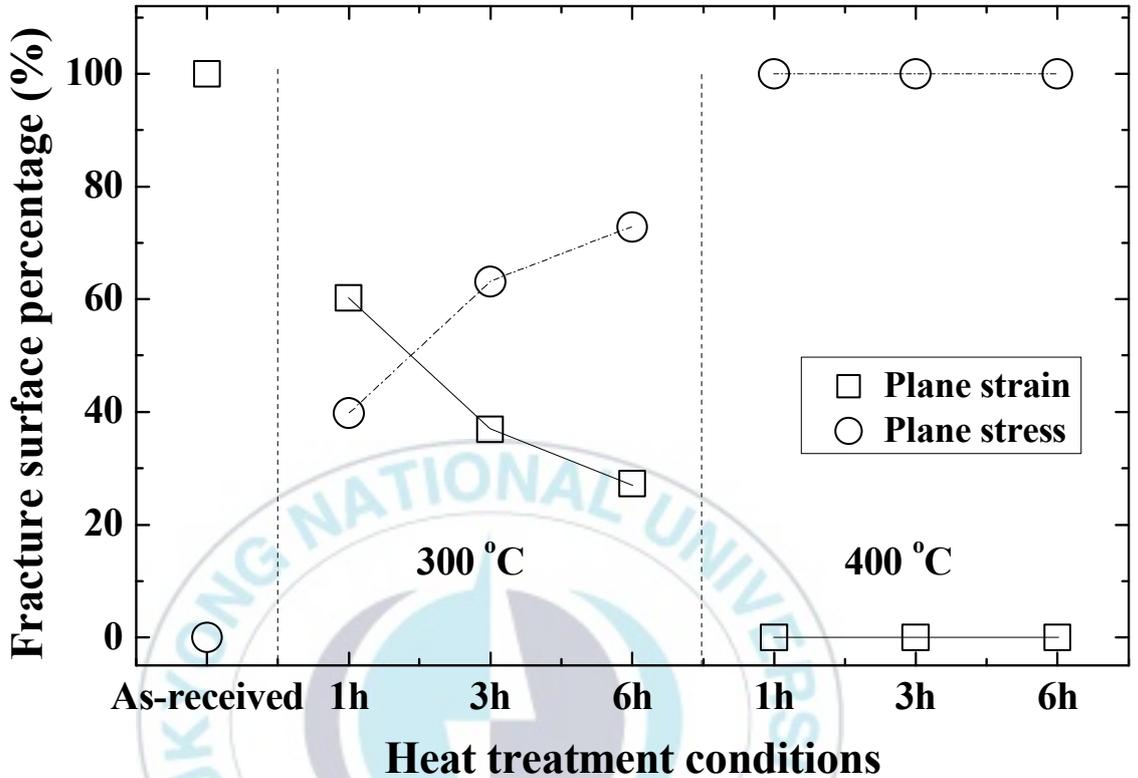


Fig. 7 Relationship of fracture surface percentage and heat treatment conditions

Fig. 8은 금속현미경 조직을 나타낸다. (a)모재시험편인 SM45C는 아공석강이므로 페라이트와 펄라이트이다. 그림에서 흰 조직은 페라이트, 검은 조직은 펄라이트 조직인 것을 확인 할 수 있다. Fig. 8(b), (c) 및 (d)는 870°C-4h 침탄 후, 300°C-1h, 3h, 6h 시험편의 템퍼링한 조직을 나타낸다. 모재시험편이 비하여 결정립의 크기가 매우 미세한 것을 알 수 있다. 이것은 Fe가 710°C에서 오스테나이트가 α 철과 시멘타이트로 바뀌는 공석변태 과정을 거치지만, 급랭 시에는 반응이 일부 저지되면서 α 철에 탄소가 과다 고용된 상태인

마르텐사이트로 되었다고 판단된다. 또한, 300°C 템퍼링 과정에서 결정립의 크기가 감소하였기 때문에 조직의 경도와 강도가 매우 증가하였다고 볼 수 있다. 그러나 마르텐사이트는 탄소를 과도하게 포함하였기 때문에 잘 깨지는 취성적인 특징을 가지고 있다. 이러한 취성을 제거하기 위하여는 템퍼링을 한다. 300°C는 연성에 큰 변화를 주지 못하는 저온 템퍼링으로 연성보다 강도 증가가 필요할 경우 사용된다. Fig. 8(e), (f) 및 (g)는 400°C-1h, 3h, 6h 시험편의 템퍼링한 조직이다. 400°C-1h, 3h 시험편은 300°C 시험편과 비교하였을 때, 조직이 조금 더 미세해진 것을 관찰할 수 있으나, 별다른 차이를 관찰할 수 없었다. 그러나 400°C-6h 시험편은 다른 조직들과는 다르게 마르텐사이트 조직 사이에 검정색 침상조직이 나타났다. 이것은 템퍼드마르텐사이트(Tempered Martensite)라 판단된다.



(a)

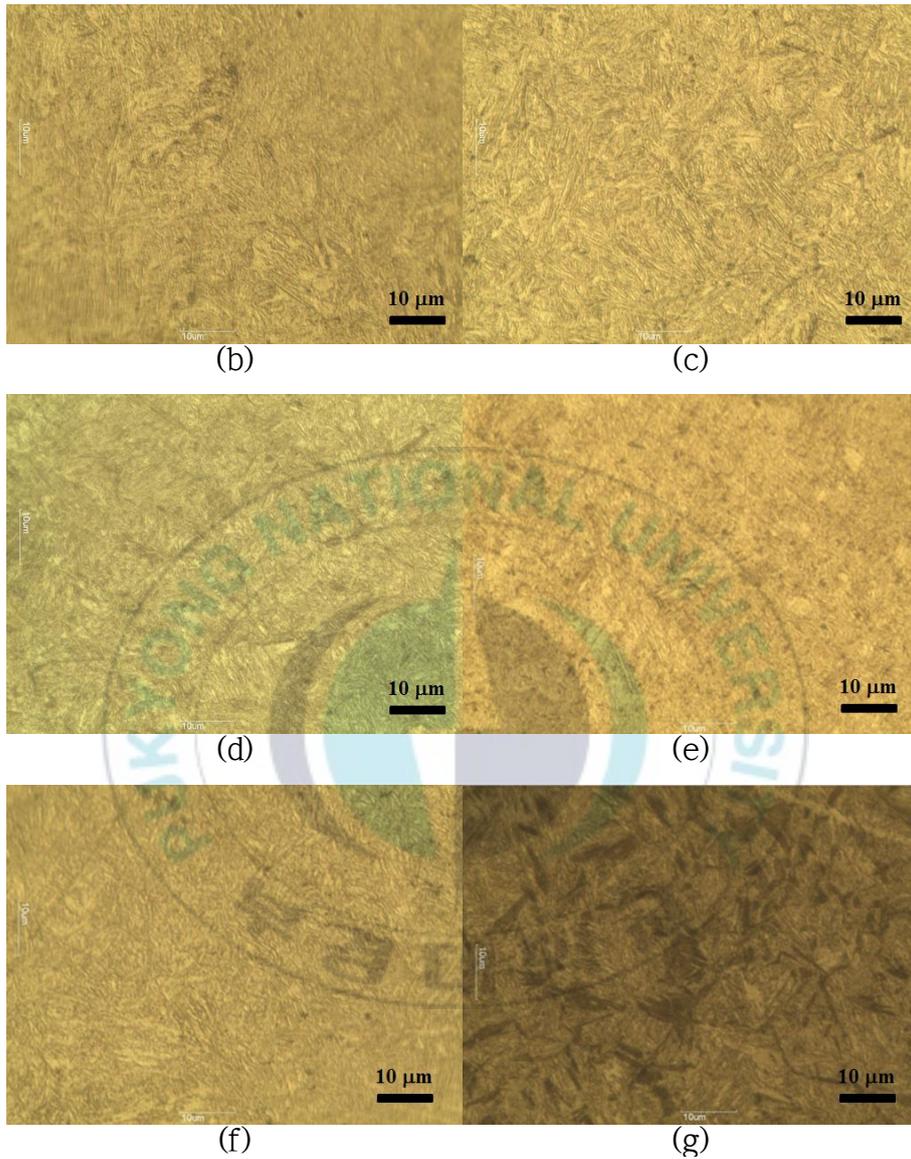


Fig. 8 Metallic microscopy structure. (a) As-received specimen, (b) 300°C -1h specimen, (c) 300°C -3h specimen, (d) 300°C -6h specimen, (e) 400°C -1h specimen, (f) 400°C -3h specimen, (g) 400°C -6h specimen

3.2 로크웰 경도 및 충격 흡수에너지

변동하는 재료의 기계적 특성은 와이블 통계(선형회귀법) 해석이 가장 일반적인 방법이다. 기계적 특성에서 확률 P를 나타내는 누적 분포 함수는 다음 식으로 표현된다.

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$$

여기서 P는 기계적 특성 값의 확률, α 와 β 는 각각 형상계수와 척도계수이다. x는 기계적 특성값이다. 척도계수 β 는 63.2%의 시험편에서 기계적 특성값을 나타내며, α 는 기계적 특성값의 분산을 나타내 계수이다. α 가 클수록 기계적 특성값의 특성변화가 작고 재료가 균일함을 나타낸다.

Fig. 9는 모재 및 템퍼링 시험편의 로크웰 경도를 나타낸다. 그림에서 모재시험편은 약 27.5~32.9HRc로 분산이 나타났으나, 300°C-1h, 3h 및 6h 시험편은 각각 약 58.8~62.5HRc, 56.3~61.4HRc, 54.8~60.0HRc로 분산이 나타났다. 그러나 400°C-1h, 3h 및 6h 시험편은 각각 약 51.0~55.0HRc, 50~53.2HRc, 44.0~46.6HRc로 나타났다. 이와같이 로크웰 경도는 일정하게 확정된 값이 아니라, 분산된 것을 알 수 있다.

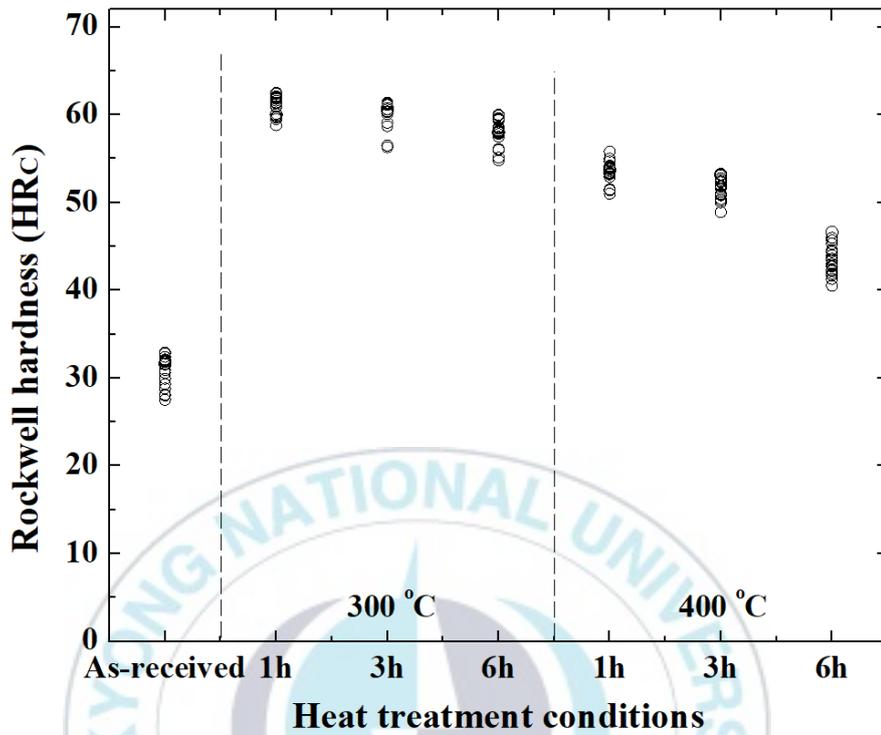


Fig. 9 Rockwell hardness according to heat treatment conditions

Fig. 10은 모재시험편과 템퍼링 시험편에 대한 로크웰 경도를 와이블 확률로 나타낸 것이다. 로크웰 경도는 와이블 확률분포로 설명할 수 있다. 로크웰 경도에 대한 해석 결과를 Table 1에 나타내며, 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 같이 나타내었다. 이상의 결과에서, 모재의 형상 파라미터가 21.18로 가장 적게 나타났으며, 300°C 시험편은 모재보다 각각 214%(1h), 134%(3h) 및 114%(6h) 크게 나타났다. 그리고 400°C 시험편은 모재보다 각각 158%(1h), 141%(3h) 및 122%(6h) 크게 나타났다. 300°C 및 400°C 시험편은 템퍼링 시간이 길어짐에 따라서 작아지는 경향을 나타내었으며, 300°C 시험편의 로크웰경도는 400°C 시험편보다 모두 높게 나타났다. 한편 척도 파라미터는 300°C 시험편은 모재시험편보다 각각 약 94%(1h), 92%(3h) 및 85%(6h) 크게 나타났다. 한편 400°C 시험편은 모재시험편보다 각각 70%(1h), 64%(3h) 및 39%(6h) 크게 나타났으나, 300°C 시험편보다 작았다. 또한 모재시험편의 변동계수는 0.069으로 가장 크게 나타났으나, 300°C 시험편은 0.017(1h), 0.037(3h) 및 0.020(6h)이었다. 400°C 시험편은 0.022(1h), 0.023(3h) 및 0.044(6h)이었다. 각 템퍼링 온도에서 1h의 변동계수가 약간 작게 나타났다.

위의 로크웰 경도 결과에서 300°C-1h 시험편의 형상 및 척도 파라미터는 다른 조건 시험편보다 크게 나타나, 경도의 분산이 적으며, 가장 우수한 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

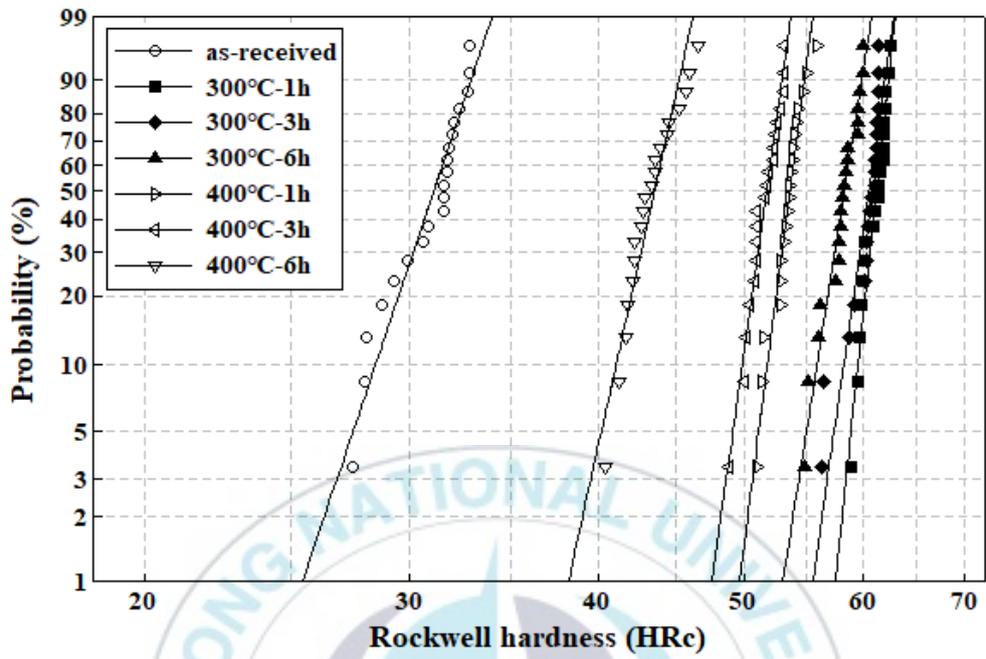


Fig. 10 Weibull plot of Rockwell hardness according to heat treatment conditions

Table 1 The estimated Weibull parameters of specimens by Rockwell hardness

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/Std./ COV
As-received	21.18	31.68	30.93/1.724/ 0.069
300°C -1h	66.48	61.53	61.03/1.098/ 0.017
300°C -3h	49.49	60.92	60.27/1.517/ 0.037
300°C -6h	45.32	58.72	58.03/1.517/ 0.020
400°C -1h	54.58	53.97	53.44/1.174/ 0.022
400°C -3h	51.11	52.10	51.56/1.195/ 0.023
400°C -6h	32.27	44.10	43.39/1.648/ 0.044

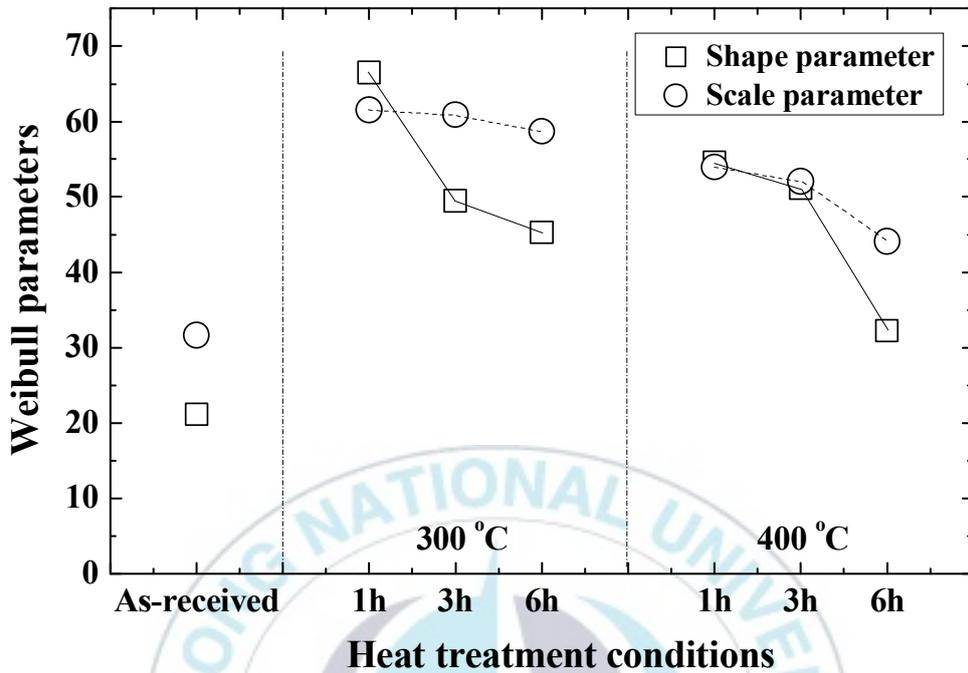


Fig. 11 Shape parameter and scale parameter obtained from Weibull probability of Rockwell hardness according to heat treatment conditions

Fig. 11은 Table 1의 형상 파라미터와 척도 파라미터를 나타낸 것이다. 템퍼링 시험편의 형상 파라미터와 척도 파라미터는 모재시험편의 것보다 높다. 300°C 시험편의 형상 파라미터는 모재시험편보다 각각 214%(1h), 134%(3h) 및 114%(6h) 높게 나타났다. 400°C 시험편은 158%(1h), 141%(3h) 및 52%(6h) 높게 나타났다. 한편 300°C 시험편의 척도 파라미터는 모재시험편보다 각각 94%(1h), 92%(3h) 및 85%(6h) 높게 나타났다. 400°C 시험편은 70%(1h), 64%(3h) 및 39%(6h) 높게 나타났다. 이와같이 형상 파라미터와 척도 파라미터는 각 템퍼링 온도에서 시간이 증가할수록 감소하였고, 400°C 시험

편이 300°C 시험편보다 더 감소하였다. 이 결과에서 300°C-1h 시험편의 형상 파라미터와 척도 파라미터가 가장 커서 분산이 가장 작으며, 로크웰 경도가 가장 높게 나타나, 가장 우수한 템퍼링 조건이라 판단된다.

Fig. 12는 모재 및 템퍼링 시험편의 충격흡수 에너지를 나타낸다. 그림에서 모재 시험편은 약 15~50 J로 분산이 많으나, 300°C 시험편은 약 6~17 J로 분산이 적었다. 그러나 400°C 시험편은 시간에 따라서 다르게 나타났다. 400°C-1h 시험편은 약 38~50 J, 400°C-3h 시험편은 약 80~97 J 및 400°C-6h 시험편은 약 46~62 J를 나타내었다. 이와 같이 충격흡수 에너지는 일정하게 확정된 값이 아니라, 분산된 값이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 모재 시험편과 템퍼링 시험편에 대한 충격흡수 에너지를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 충격흡수 에너지에 대한 해석 결과를 Table 2에 나타내며, 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 같이 나타내었다. 이상의 결과에서, 모재의 형상 파라미터가 3.14로 가장 적게 나타났으며, 300°C 시험편은 모재보다 각각 61%(1h), 75%(3h) 및 46%(6h) 크게 나타났다. 그리고 400°C 시험편은 모재보다 각각 433%(1h), 598%(3h) 및 232%(6h) 크게 나타났다. 300°C 시험편은 시간이 길어짐에 따라서 작아지는 경향을 나타내었으나, 400°C-3h 시험편은 매우 큰 값을 나타내었다. 그러나 1h 및 6h 시험편은 시간이 긴 것이 작게 나타났다. 한편 척도 파라미터는 300°C 시험편이 모재 시험편보다 각각 약 68%(1h과 3h) 및 62%(6h) 작게 나타났다. 400°C 시험편은 모재 시험편보다 각각 54%, 205% 및 83% 크게 나타났다. 또한 변동계수는 척도 파라미터와 비슷한 경향을 나타내었다. 즉, 모재 시험편은 0.40으로 가장 크게 나

타났으나, 300°C 시험편의 1h와 3h는 각각 0.24와 0.19이고, 6h는 0.28이었다. 400°C 시험편의 1h와 3h는 각각 0.07과 0.05이며, 6h는 0.11이었다. 각 온도에서 6h가 약간 크게 나타났다.

위의 결과에서 400°C-3h 시험편의 형상 및 척도 파라미터는 다른 조건 시험편보다 크게 나타나, 충격흡수 에너지의 분산이 적으며, 우수한 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

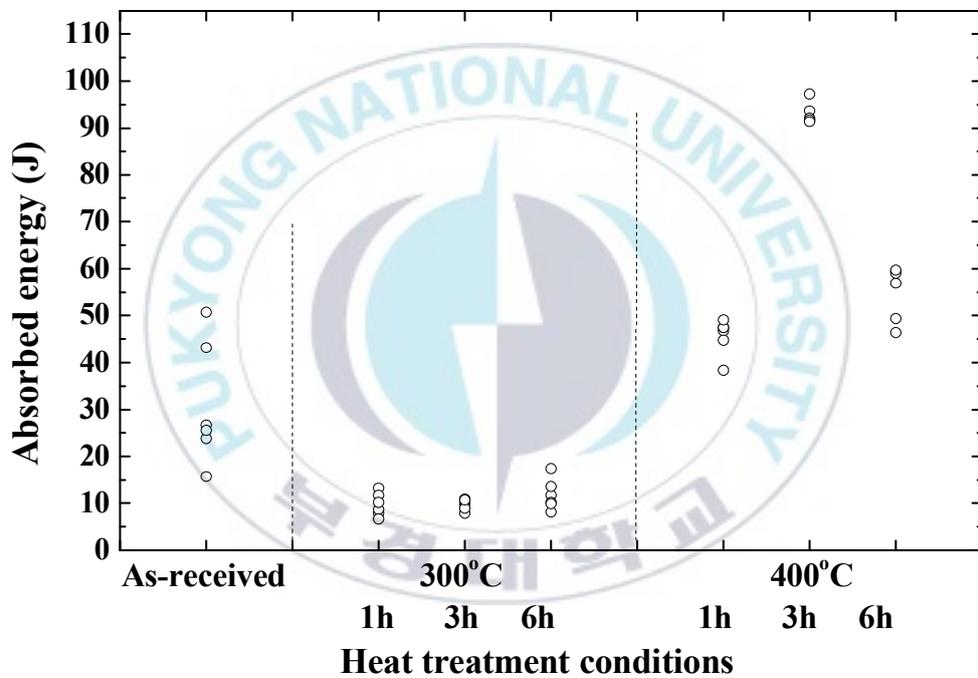


Fig. 12 Comparison of absorbed energy for as-received specimen and heat treatment specimen

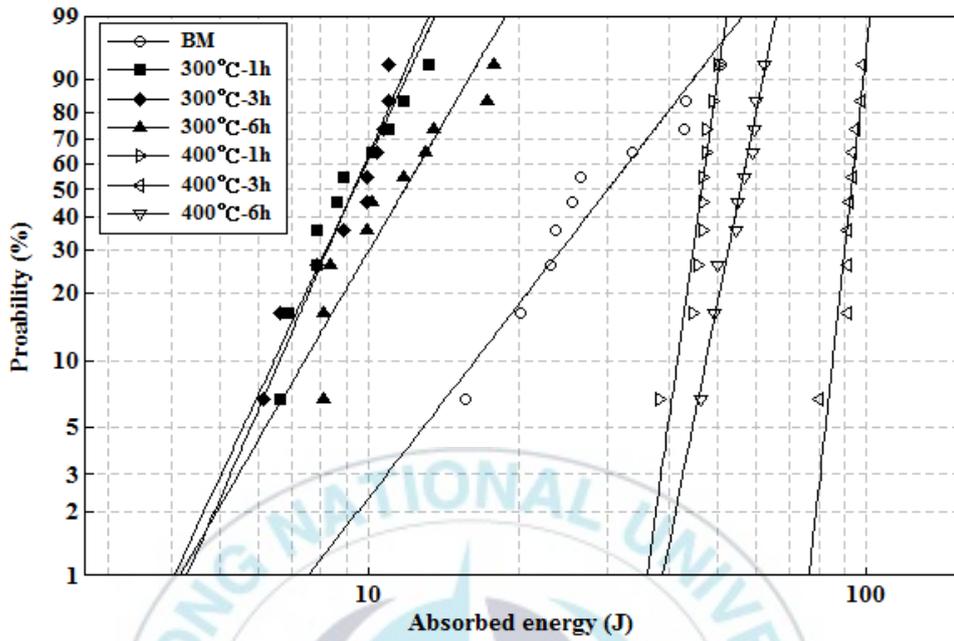


Fig. 13 Weibull plot of absorbed energy for as-received specimen and heat treatment specimen

Table 2 The estimated Weibull parameters of absorbed energy

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	STD/Mean/COV
As-received	3.14	34.1	11.61/30.63/0.40
300°C -1h	5.09	10.1	2.16/9.29/0.24
300°C -3h	5.50	10.0	1.78/9.24/0.19
300°C -6h	4.07	12.9	3.60/11.83/0.28
400°C -1h	16.75	47.7	3.18/46.29/0.07
400°C -3h	21.93	94.6	4.93/92.49/0.05
400°C -6h	11.80	57.5	5.19/55.27/0.11

Fig. 14는 모재시험편과 템퍼링 시험편의 파단면을 나타낸다. 모재시험편과 300°C 시험편은 거의 취성파면을 나타내고 있으나, 400°C 시험편은 연성과 취성파면을 나타낸다. 이것은 앞의 Fig. 6,7과 잘 일치한다. 특히 400°C -3h 시험편은 Fig. 15에 타원으로 나타낸 것과 같이 파면에 찢어진 부분이 많이 나타났다. 이것은 충격 에너지를 흡수하는 역할을 하여 높은 충격흡수 에너지를 나타내었다.



(a)

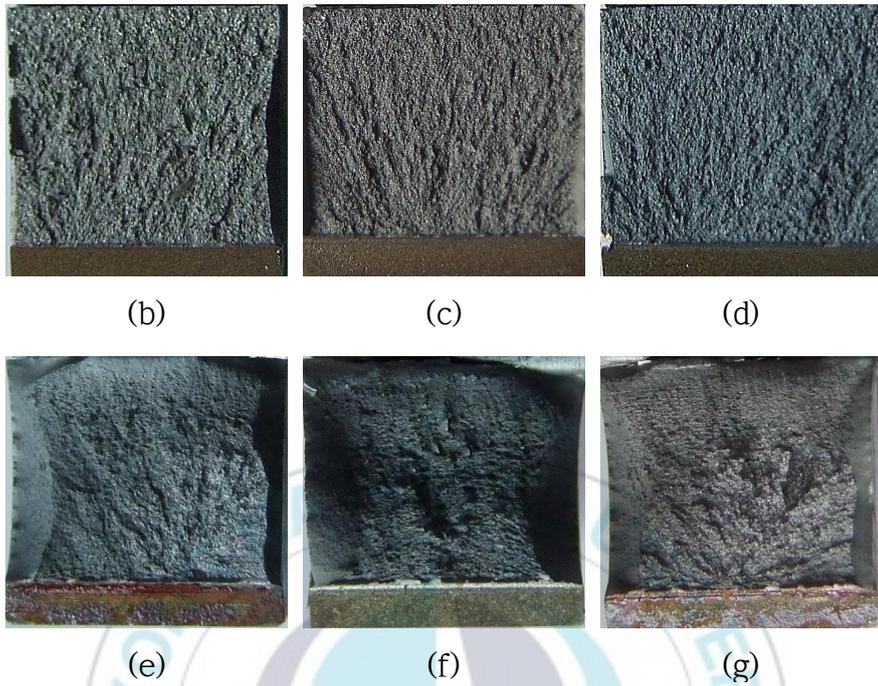


Fig. 14 Fracture surface for as-received specimen and heat treatment specimen. (a) As-received specimen, (b) 300°C -1h specimen, (c) 300°C -3h specimen, (d) 300°C -6h specimen, (e) 400°C -1h specimen, (f) 400°C -3h specimen, (g) 400°C -6h specimen

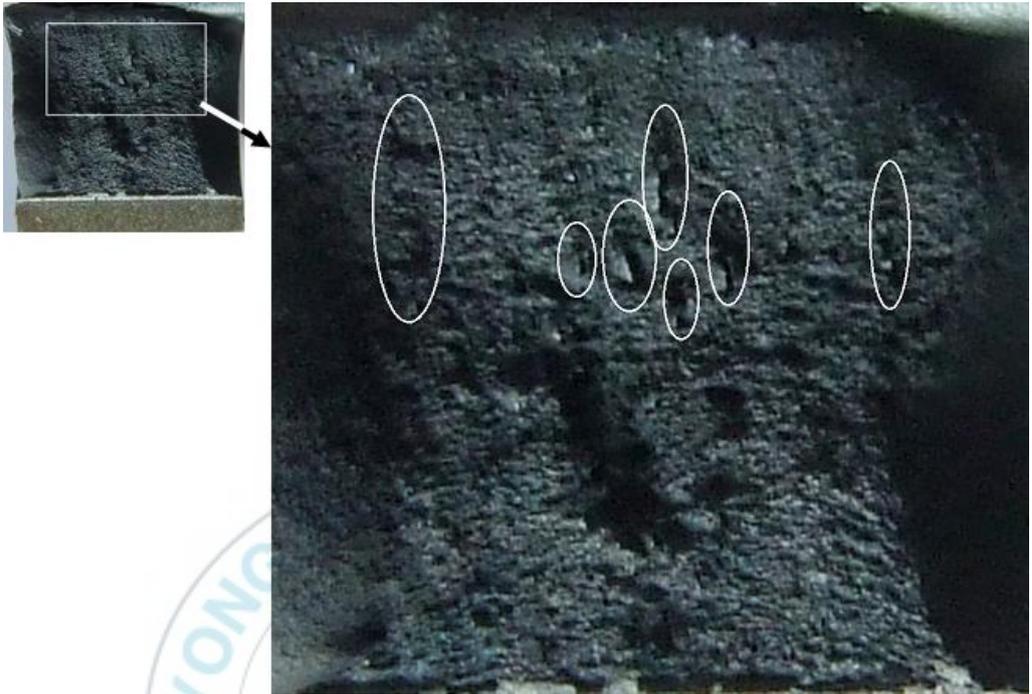
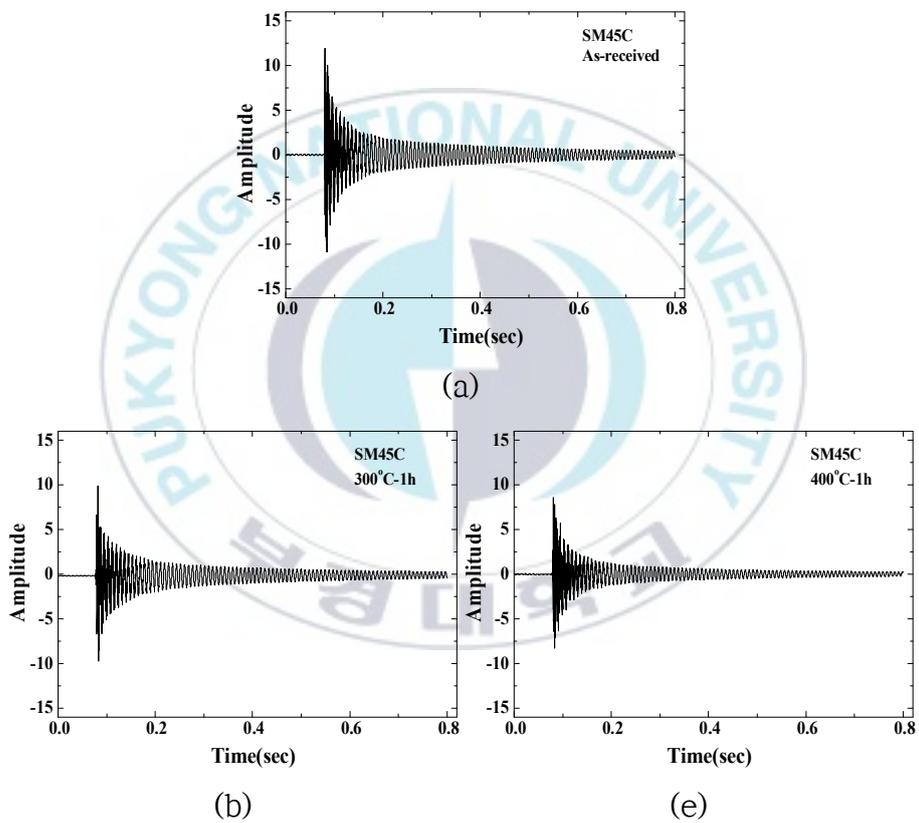


Fig. 15 The bursted surface of the 400°C-3h specimen obtained from the impact test

3.3 감쇠능

Fig. 16은 시험편에서 얻어진 감쇠곡선을 나타낸다. X축은 시간을 나타내고, Y축은 진폭을 나타낸다. 감쇠곡선은 시험편에 진동을 가한 후에 진폭이 줄어들고 있는 것을 알 수 있다.



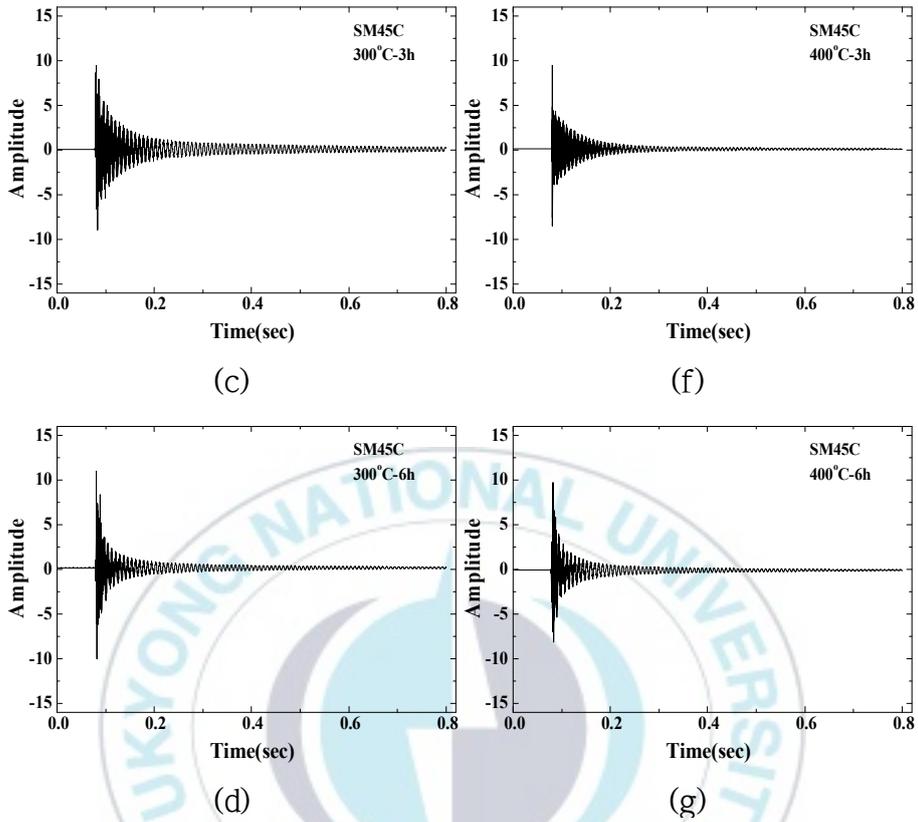


Fig. 16 Damping curve from as-received specimen and heat treated specimens. (a) As-received specimen, (b) 300°C-1h specimen, (c) 300°C-3h specimen, (d) 300°C-6h specimen, (e) 400°C-1h specimen, (f) 400°C-3h specimen, (g) 400°C-6h specimen

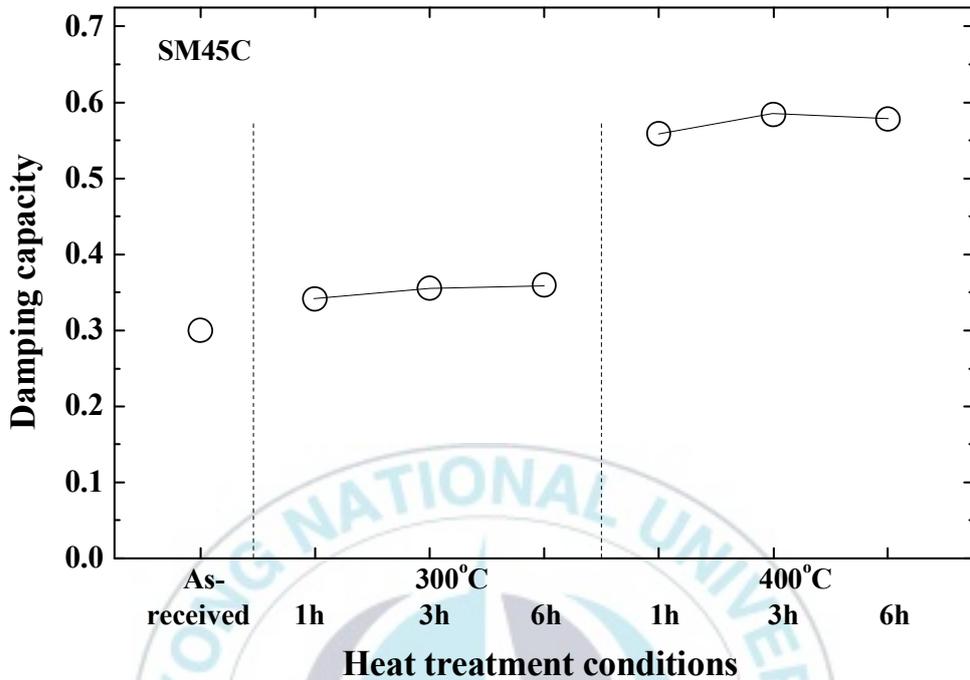


Fig. 17 Damping capacity according to heat treatment conditions

Fig. 17은 열처리 조건에 따르는 감쇠능을 나타낸다. 템퍼링 처리한 시험편은 모재시험편보다 감쇠능이 증가하였다. 400°C 시험편이 300°C 시험편보다 더 크게 나타났다. ϵ -마르텐사이트는 감쇠능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[16,17] 본 연구에서는 템퍼드 마르텐사이트의 생성이 감쇠능 증가의 원인이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 기계구조용 탄소강재로 많이 사용되는 SM45C를 Quenching & Tempering 한 후 870°C 에서 4시간 침탄 후, 300°C 및 400°C 에서 1, 3 및 6시간 템퍼링한 시험편을 사용하여, 인장시험, 경도시험, 충격시험 및 감쇠능을 평가하였다. 특히 경도 및 충격 흡수에너지는 와이블 통계해석에 의한 신뢰성평가를 실시하였다.

- (1) 인장응력, 변형률, 파단면 관찰에서 300°C-1h 시험편이 가장 우수한 열처리 조건이라 판단된다. 템퍼링 온도 및 시간이 증가함에 따라서 평탄한 파면(평면변형률)에서 전단형 파면(평면응력)으로 변화였다.
- (2) 금속현미경 조직에서, 모재시험편은 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite)이다. 300°C 시험편은 모재시험편에 비하여 결정립이 매우 미세하여, 경도와 강도가 증가하였다. 400°C 시험편은 300°C 시험편보다 조금 더 미세하며, 템퍼드 마르텐사이트(Tempered Martensite)가 형성되어 강도와 경도가 감소하였다.
- (3) 300°C-1h 시험편은 로크웰 경도의 형상 및 척도 파라미터가 다른 조건 시험편보다 크게 나타나, 분산이 적으며 가장 우수한 특성을 나타내었다.
- (4) 400°C-3h 시험편은 충격흡수 에너지의 형상 및 척도 파라미터가 다른 조건 시험편보다 크게 나타나, 분산이 적으며 우수한 특성

을 나타내었다.

(5) 충격시험 파면은 찢어진 부분이 많이 나타났으며, 이것은 충격 에너지를 흡수하는 역할을 하여 높은 충격흡수 에너지를 나타내었다.

(6) 400℃ 시험편의 감쇠능은 템퍼드 마르텐사이트(Tempered Martensite)의 생성으로 인하여, 300℃ 시험편보다 우수하였다.



참고문헌

1. C.K. Woo and H.S. Kim, 1988, “A Study on the Fatigue Failure Behavior SM45C on Ion-Nitrided under Alternating Tension-Compression Axial Loading “, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 71-80.
2. W.I. Kim and S.J. Heo, 1993, “A Study on the Surface Roughness Influenced by SM45C Hardness in High Frequency Induction Hardening” , Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8.
3. J.S. Park, O.Y. Lee, K.H. Song and Y.H. Han, “1995, ” Surface Hardening of SM45C Steel by CO2 Laser “, Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 8, No. 1, pp. 44-52.
4. S. Lyu, T. Nam, M. Ahn and J. Park, “2000, ” Characteristics of Refrigerant for Heat-treatment Deformation Control of SM45C Steel “, Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 13, No. 5, pp. 330-336.
5. S.K. Lyu, 2002, “Characteristic of Quenching Refrigerant for Heat Treatment Deformation Control of SM45C Steel” , The Korean Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 647-654.
6. W.C. Jeong, 2006, “Optimization of Spheroidizing Annealing Conditions in SM45C Steel” , Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 19, No. 3, pp. 149-155.
7. H. Yang and O. Min, 2007, “Dynamic Behavior of SM45C at High Strain-rate and High Temperature” , Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. Vol. 31, No. 11, pp. 1093-1099.

8. Y.K. Ko, K.I. Moon, W.B. Lee, S.W. Kim and Y.Z. You, 2007, “Micro Structure and the Coefficient of Friction with H₂S and C₃H₈ Gas Addition During Plasma Sulf-nitriding of SM45C Carbon Steel” , Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 20, No. 5, pp. 237-242.
9. Y.B. Lee and J.K. Jung, 2008, “An Experimental Study on Fatigue Behavior in Welded SM45C Steel Rod” , Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 32, No. 6, pp. 519-525.
DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.6.519
10. Y.S. Kong and Y.W. Park, 2017, “Rotary Bending Fatigue Characteristics According to Optimal Friction Welding of SF45 to SM45C Steel Bars “ , Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 41, No. 3, pp.219-224.
DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.3.219>
11. K.W. Nam and K.H. Lee, 2018, “Mechanical and Immersion Characteristics of Weled EH36 Steel with Different Heat Input” , Journal of the Korean Society for Power System Engineering - Vol. 22, No. 3, pp. 51-59.
DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.3.051>
12. J.H. Kwak, C.Y. Kang and K.H. Kim, 2018, “Internal Friction Behavior in AZ31 Magnesium Alloy after Annealing Treatment” , Journal of the Korean Society for Power System Engineering - Vol. 22, No. 1, pp. 87-93.
<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.087>
13. K.W. Nam, S.J. Kim and D.S. Kim, 2015, “Weibull Statistical Analysis on Mechanical Properties in ZrO₂ with SiC Additive” , Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 39, No. 9, pp. 901~907.

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.901>

14. S.H. Ahn, D.S. Kim and K.W. Nam, 2016, “Weibull Statistical Analysis According to Vickers Indentation Load of Peened ZrO₂ Composites Ceramics by Different Shot Size” , Trans. Korean Soc. Mech. Eng.A, Vol.40, No.12, pp.987~995.

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.12.987>

15. K.H. Lee and K.W. Nam, 2018, “Weibull statistical analysis for vickers hardness of Al₂O₃/SiC composite according to the SiC concentration” , Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 19, No. 1, pp. 75~79.

16. T.Y. Hur, J.P. Wang and C.Y. Kang, 2011, “Effect of Grain Size on the Deformation Induced Martensite Transformation and Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steel with High Amount of Mn” , Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 24, No. 5, pp. 271-276.

17. M.G. Kwon and C.Y. Kang, 2014, “Correlation between Tensile Properties and Damping Capacity of 316L Stainless Steel” , Korean Journal of Materials Research, Vol. 24, No. 1, pp. 1-5.

DOI:<https://doi.org/10.3740/MRSK.2014.24.1.1>

발표 논문 목록

1. 김민헌, 구세훈, 남기우, 김동규, 김권후, 강창룡 (2019), “열처리한 SM45C의 로크웰 경도의 와이블 분포”, 2019년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회논문집, pp. 277-278.
Min-Heon Kim, Se-Hun Gu, Ki-Woo Nam, Dong-Gyu Kim, Kwon-Hu Kim and Chang-Yong Kang (2019), “Weibull Distribution for Rockwell Hardness of Heat Treated SM45C”, Proceeding of The KSME 2019 Spring Annual Meeting, pp. 277-278.
2. 구세훈, 김병수, 김동규, 강창룡, 남기우, (2019), “열처리한 SM45C의 충격흡수에너지에 대한 와이블 분포”, 한국동력기계공학회 2019년도 춘계학술대회논문집, pp. 78-79.
Se-Hun Gu, Byung-Soo Kim, Dong-Gyu Kim, Chang-Yong Kang and Ki-Woo Nam, (2019), “Weibull distribution for Impact Absorbed Energy of Heat Treated SM45C”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2019 Spring Annual Meeting, pp. 78-79.