

## 뜨임한 구조용강 SCM435의 경도 및 충격 흡수에너지에 대한 신뢰성 평가

### Reliability Evaluation of Hardness and Impact Absorption Energy of Tempered Structure Steel SCM435

윤서현<sup>1</sup>, 구세훈<sup>2</sup>, 남기우<sup>3\*</sup>

Seo-Hyun Yun<sup>1</sup>, Se-Hun Gu<sup>2</sup>, Ki-Woo Nam<sup>3\*</sup>

#### 〈Abstract〉

SM45C steel, 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 and impact test. 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 and the observation of fracture surface. 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.

*Keywords : Structure Steel, Hardness, Absorption Energy, Weibull Analysis*

1 정회원, 부경대학교 마린융합디자인협동, 박사과정

2 학생회원, 부경대학교 재료공학과, 석사과정

3\* 정회원, 부경대학교 재료공학과, 교수

E-mail:namkw@pknu.ac.kr

1 Interdisciplinary Program of Marine Convergence Design,  
Pukyong National University

2 Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong  
National University

3\* Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong  
National University

### 1. 서론

국산 기계구조용강의 품질은 세계 최고 수준에 이르고 있으나, 특성에 맞는 자료가 부족하여 설계에 어려움의 따르고 있다. 탄소강 SM45C는 기계구조 및 금형 등에 많이 사용되는 재료이다. SM45C에 관한 연구는 이온질화하여 반복 인장-압축의 피로 거동[1], 고주파 경화처리[2], CO<sub>2</sub> 레이저를 사용한 표면경화[3], 불림 최적화[4], 플라즈마 질화처리강의 마모특성[5], 이종재와의 마찰용접 특성[6] 등이 있다. 또한 용접된 선박구조용 강판의 기계적 및 침지특성 평가[7] 및 열처리 후의 감쇠능 평가[8] 등이 있다. 그러나 구조용강재의 강도, 경도 등의 기계적 특성은 재료 개발의 기초 자료로 사용하기 위해서는 통계적 특성(평균값, 분산) 및 정량적 확률분포 특성을 파악하고 평가하는 것이 매우 중요하다.[9]

본 연구는 기계구조용강로 많이 사용되는 SM45C를 사용하여, 인장시험, 경도시험 및 충격시험을 실시하였다. 특히 경도 및 충격 흡수에너지는 뜨임온도 및 시간에 의한 영향을 검토하기 위하여 와이블 통계 해석을 실시하였다.

### 2. 재료 및 실험 방법

재료는 기계구조용 탄소강재인 SM45C이다. 모재 시험편은 850°C에서 1.5시간 담금질한 후에 530°C에서 2시간 뜨임한 것을 사용하였다. 열처리 시험편은 모재 시험편을 870°C에서 4시간 침탄 후에 300°C 및 400°C에서 1, 3 및 6시간 뜨임하였다. 이와 같은 조건은 200~400°C에서 일반적으로 실시하고 있으나,[10] 체계적인 결과를 얻기 위한 연구의 시도이다. 인장시험은 기계식 만능재료시험기(DTU-900MH, 대경테크)를 사용하였으며, 크로

스헤드 속도는 5 mm/min이었다. 경도는 로크웰 경도기를 사용하여, 각각 20회 측정하여 특성을 평가하였다. 충격시험은 20 kgf-m의 충격시험기를 사용하여, 각 열처리 조건에 10개의 시험편의 충격 흡수에너지를 측정하였다. 충격시험편은 V-노치 표준시험편을 사용하였다. 측정된 로크웰경도와 흡수에너지는 와이블 통계 해석을 수행하였다.

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

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 평균인장응력과 열처리 조건과의 관계를 나타낸다. 300°C 및 400°C의 모든 뜨임시험편은 모재시험편보다 모든 시간에서 응력이 증가하였지만, 각 온도에서 시간이 증가함에 따라서 응력은 감소하였다. 뜨임 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.

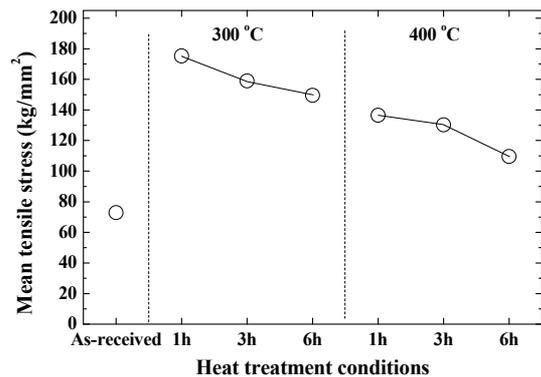


Fig. 1 Mean tensile stress according to heat treatment conditions

Fig. 2는 인장파단면을 대표적으로 나타내었다. (a)는 모재시험편, (b)는 400°C-6h 시험편이다. 모재시험편은 하중방향에 대하여 수직한 평탄한 파면(평면변형률)을 나타내었다. 그러나 뜨임 온도 및 시간이 증가함에 따라서 평탄한 파면(평면변형률)에서 전단형파면(평면응력)으로 변화하였다. 모재 시험편은 100% 평면변형률파면을 나타내었다.

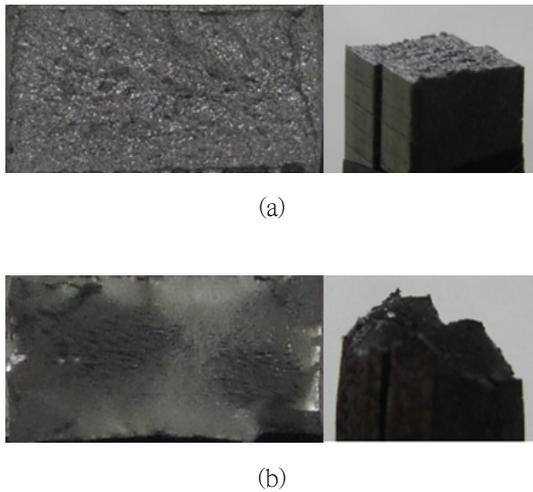


Fig. 2 Fracture surface. (a) As-received specimen, (b) 400°C-6h specimen

Fig. 3은 파면률을 나타낸다. 300°C 시험편은 평면응력파면이 나타났고, 뜨임 시간이 길어질수록 평면응력파면이 넓어지고, 평면변형률파면이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 300°C에서 뜨임할 경우 청열 취성에 의한 영향이라 판단된다. 300°C에서 뜨임 시간이 길어질수록 평면응력파면이 늘어나는 것은 시간에 따라 탈탄 현상에 의하여 격자 내부에 과포화 되어 있던 탄소가 표면 근방부터 산소와 반응하여 이산화탄소가 되면서 격자 변형이 줄어들고, 제2상의 존재인 탄소가 빠져나갔기 때문에 전위이동장벽으로써의 역할이 줄어들었을 것으로 예측된다. 400°C 뜨임의 경우에는

청열 취성 범위보다 높은 온도이므로 고온 뜨임으로 볼 수 있다. 모든 뜨임 시간에서 평면응력파면이 나타났으며, 파면은 완전한 컵&콘 형태로 400°C 뜨임은 담금질로 인하여 높아진 경도와 강도를 많이 낮출 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 높은 온도에 의한 탈탄 현상으로 인하여 강도와 경도가 낮아진 것으로 예측된다. 이상과 같은 인장시험의 결과에서 300°C-1h 시험편이 최적의 기계적 특성이라 판단된다.

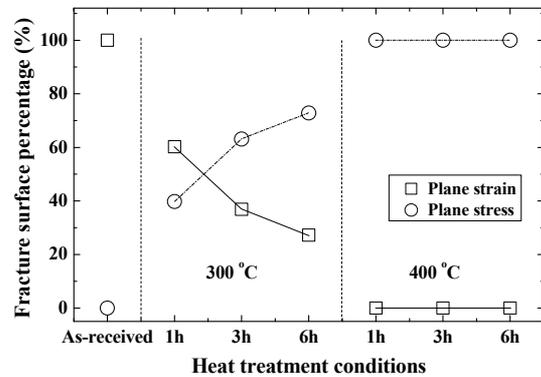


Fig. 3 Relationship of fracture surface percentage and heat treatment conditions

Fig. 4는 금속현미경 조직을 나타낸다. (a) 모재 시험편은 아공석강이므로 페라이트(흰색)와 펄라이트(검은색) 조직인 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)-(d)는 300°C-1h, 3h, 6h 뜨임한 조직이다. 모재 시험편이 비하여 결정립의 크기가 매우 미세한 것을 알 수 있다. 이것은 Fe가 710°C에서 오스테나이트가 α철과 시멘타이트로 바뀌는 공석변태 과정을 거치지만, 급랭 시에는 반응이 일부 억제되면서 α철에 탄소가 과다 고용된 상태인 마르텐사이트로 되었다고 판단된다. 또한, 300°C 뜨임 과정에서 결정립의 크기가 감소하였기 때문에 조직의 경도와 강도가 매우 증가하였다고 볼 수 있다. 그러나 마르텐사이트는 탄소를 과도하게 포함

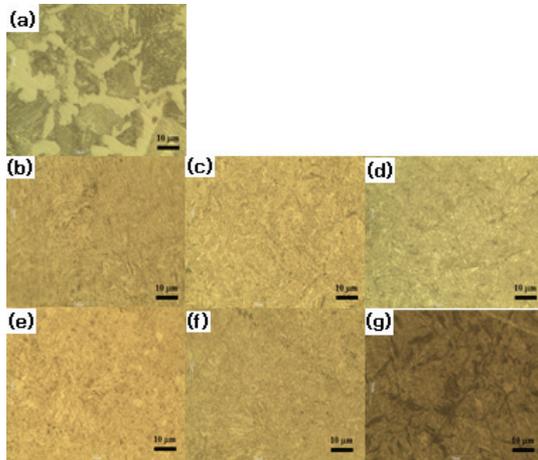


Fig. 4 Metallic microscopy structure. (a) As-received specimen, (b) 300°C-1h specimen, (c) 300°C-3h specimen, (d) 300°C-6h specimen, (e) 400°C-1h specimen, (f) 400°C-3h specimen, (g) 400°C-6h specimen

하였기 때문에 취성적인 특징을 가지고 있다. 이러한 취성을 제거하기 위하여 뜨임을 한다. 300°C는 연성에 큰 변화를 주지 못하는 저온 뜨임으로 연성보다 강도 증가가 필요할 경우 사용된다. Fig. 8(e)-(g)는 400°C-1h, 3h, 6h 뜨임한 조직이다. 400°C-1h, 3h 시험편은 300°C 시험편보다 약간 미세한 조직을 관찰할 수 있으나, 별다른 차이를 관찰할 수 없었다. 그러나 400°C-6h 시험편은 다른 조직들과는 다르게 마르텐사이트 조직 사이에 검정색 침상조직이 나타났다. 이것은 템퍼드 마르텐사이트라 판단된다.

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

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

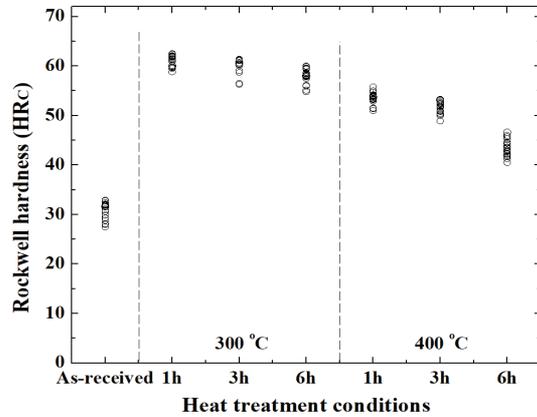


Fig. 5 Rockwell hardness according to heat treatment conditions

여기서 P는 기계적 특성값의 확률,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 형상계수와 척도계수이다. x는 기계적 특성값이다. 척도계수  $\beta$ 는 63.2%의 시험편에서 기계적 특성값을 나타내며,  $\alpha$ 는 기계적 특성값의 분산을 나타내 계수이다.  $\alpha$ 가 클수록 기계적 특성값의 특성변화가 작고 재료가 균일함을 나타낸다.

Fig. 5는 모재 및 뜨임 시험편의 로크웰경도를 나타낸다. 모재 시험편은 약 27.5~32.9HRC로 가장 작으나, 300°C-1h 시험편은 모재보다 약 2배 정도 높게 나타났다. 그러나 각 온도에서 시간이 증가함에 따라서 감소하였다. 그리고 로크웰경도는 일정한 값이 아니라 변동 값을 알 수 있다.

Fig. 6은 모재 시험편과 뜨임 시험편에 대한 로크웰경도를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 로크웰경도에 대한 해석 결과를 Table 1에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균, 표준편차(Std) 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다. 이상에서, 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 522%(6h) 크게 나타났다. 300°C 및 40

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

0°C시험편은 뜨임 시간이 길어짐에 따라서 작아지는 경향을 나타내었으며, 300°C시험편의 로크웰경도는 400°C시험편보다 모두 높게 나타났다. 한편 척도 파라미터는 300°C시험편은 모재시험편보다 각각 약 94%(1h), 92%(3h) 및 85%(6h) 크게 나타났다. 한편 400°C시험편은 모재시험편보다 각각 70%(1h), 64%(3h) 및 39%(6h) 크게 나타났으나, 300°C시험편보다 작았다. 또한 모재시험편의 변동계수는 0.069으로 가장 크게 나타났으나, 300°C시험편은 0.017(1h), 0.037(3h) 및 0.020(6h)이었다.

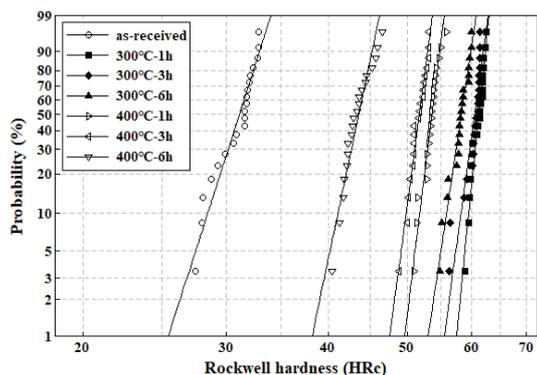


Fig. 6 Weibull plot of Rockwell hardness according to heat treatment conditions

400°C시험편은 0.022(1h), 0.023(3h) 및 0.044(6h)이었다. 각 뜨임 온도에서 1h의 변동계수가 약간 작게 나타났다.

로크웰경도 결과에서 300°C-1h시험편의 형상 및 척도 파라미터는 다른 조건보다 크게 나타나, 경도의 분산이 적으며, 가장 우수한 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 형상파라미터와 척도파라미터를 나타낸 것이다. 뜨임 시험편의 형상파라미터와 척도파라미터는 모재시험편보다 높다. 300°C 시험편의 형상파라미터는 모재시험편보다 각각 214%(1h), 134%(3h) 및 114%(6h) 높게 나타났다. 400°C시험편은 158%(1h), 141%(3h) 및 52%(6h) 높게 나타났다. 한편 300°C시험편의 척도파라미터는 모재시험편보다 각각 94%(1h), 92%(3h) 및 85%(6h) 높게 나타났다. 400°C시험편은 70%(1h), 64%(3h) 및 39%(6h) 높게 나타났다. 이와 같이 형상파라미터와 척도파라미터는 각 뜨임 온도에서 시간이 증가할수록 감소하였고, 400°C시험편이 300°C시험편보다 더 감소하였다. 이 결과에서 300°C-1h 시험편의 형상파라미터와 척도파라미터가 가장 크고, 분산이 가장 작으며, 로크웰경도가 가장 높게 나타나, 가장 우수한 뜨임조건이라 판단된다.

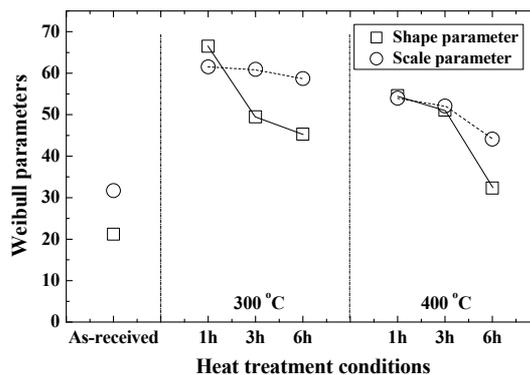


Fig. 7 Shape parameter and scale parameter from Weibull probability of Rockwell hardness according to heat treatment conditions

Fig. 8은 모재 및 뜨임 시험편의 충격흡수 에너지를 나타낸다. 모재 시험편은 약 15~50J로 분산이 많으나, 300°C 시험편은 약 6~17J로 분산이 적었다. 그러나 400°C 시험편은 시간에 따라서 다르게 나타났다. 400°C-1h 시험편은 약 38~50J, 400°C-3h 시험편은 약 80~97J 및 400°C-6h 시험편은 약 46~62J를 나타내었다. 이와 같이 충격흡수 에너지는 일정한 값인 확정치가 아니라 통계적으로 변동하고 있음을 알 수 있다.

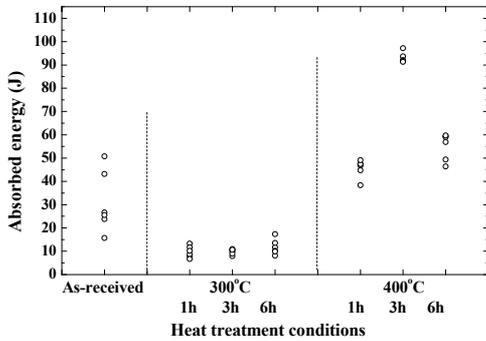


Fig. 8 Comparison of absorbed energy for as-received specimen and heat treatment specimen

Fig. 9는 모재 시험편과 뜨임 시험편에 대한 충격흡수 에너지를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 충격흡수 에너지에 대한 해석 결과를 Table 2에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균, 표준편차 (Std) 및 변동계수(COV)도 함께 나타내었다. 이상에서, 모재의 형상 파라미터가 3.14로 가장 적게 나타났다으며, 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 나타났으나, 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.

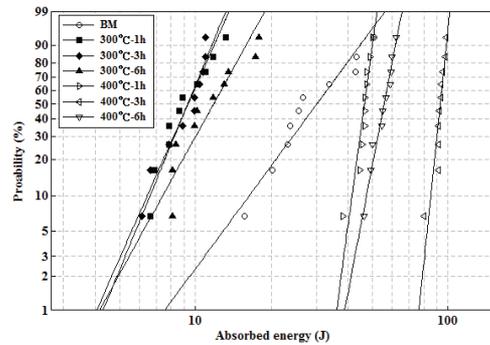


Fig. 9 Weibull plot of absorbed energy for as-received specimen and heat treatment specimen

Table 2. The estimated Weibull parameters of absorbed energy

Parameter Specimen	Shape parameter	Scale parameter	Mean/Std./COV
As-received	3.06	34.1	11.61/30.63/ 0.38
300°C-1h	5.09	10.1	2.16/9.29/ 0.23
300°C-3h	5.50	10.0	1.78/9.24/ 0.19
300°C-6h	4.07	12.9	3.60/11.83/ 0.30
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/ 0.09

## 4. 결론

본 연구는 담금질한 후, 뜨임한 SM45C강을 사용하였다. 열처리하는 이것을 사용하여 870°C에서 4시간 침탄 후, 300°C 및 400°C에서 1, 3, 6시간 뜨임하고, 인장시험, 경도시험 및 충격시험을 실시하였다. 특히 경도 및 충격 흡수에너지는 와이블 통계 해석에 의한 신뢰성 평가를 실시하였다.

- (1) 인장응력 및 파단면 관찰에서 300°C-1h 시험편이 가장 우수한 열처리 조건이라 판단된다. 뜨임 온도 및 시간이 증가함에 따라서 평탄한파면(평면변형률)에서 전단형파면(평면응력)으로 변하였다.
- (2) 금속현미경 조직에서, 모재시험편은 페라이트와 펄라이트이다. 300°C 시험편은 모재 시험편에 비하여 결정립이 매우 미세하여, 경도와 강도가 증가하였다. 400°C 시험편은 300°C 시험편보다 약간 미세하며, 템퍼드 마르텐사이트가 형성되어, 강도와 경도가 감소하였다.
- (3) 300°C-1h 시험편은 형상 및 척도 파라미터가 다른 조건보다 크게 나타나, 로크웰경도의 분산이 적으며, 가장 우수한 특성을 나타내었다.
- (4) 400°C-3h 시험편은 형상 및 척도 파라미터가 다른 조건보다 크게 나타나, 충격흡수 에너지의 분산이 적으며, 우수한 특성을 나타내었다.

## 참고문헌

- [1] C. K. Woo and H. S. Kim, "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, (1988).
- [2] W. I. Kim and S. J. Heo, "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, (1993).
- [3] J. S. Park, O. Y. Lee, K. H. Song and Y. H. Han, "Surface Hardening of SM45C Steel by CO<sub>2</sub> Laser," *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, vol. 8, no. 1, pp. 44-52, (1995).
- [4] W. C. Jeong, "Optimization of Spheroidizing Annealing Conditions in SM45C Steel," *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, vol. 19, no. 3, pp. 149-155, (2006).
- [5] Y. K. Ko, K. I. Moon, W. B. Lee, S. W. Kim and Y. Z. You, "Micro Structure and the Coefficient of Friction with H<sub>2</sub>S and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 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, (2007).
- [6] Y. S. Kong and Y. W. Park, "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, (2017).
- [7] K. W. Nam and K. H. Lee, "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, (2018).

- [8] J. H. Kwak, C. Y. Kang and K. H. Kim, "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, (2018).
- [9] K. W. Nam, S. J. Kim and D. S. Kim, "Weibull Statistical Analysis on Mechanical Properties in ZrO<sub>2</sub> with SiC Additive," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, vol. 39, no. 9, pp. 901-907, (2015).
- [10] D.J. Han, "A Study on the Difference between Surface and Core Hardness of SCM435 Steel Q/T", Ulsan University, Master's Thesis (2008).

---

(접수: 2019.10.18. 수정: 2019.11.21. 게재확정: 2019.12.05.)