

STD61 공구강의 내충격 및 내열피로 특성에 미치는 가스켄칭 압력의 영향

박현준* · 최광진** · 김종엽*** · 신승용* · 문경일*[†]

*한국생산기술연구원 열처리그룹(KITECH), **KIMET, ***주) 씬백(Thermvac.co.)

Effect on Anti-impact and Anti-thermal Fatigue Properties of STD61 Material Affected by Gas Quenching Pressure of Quenching Process

Hyun-Jun Park*, Kwang-Jin Choi**, Jong-Yeob Kim***, Seung-Yong Shin*, Kyoung-Il Moon*[†]

*Korea Institute of Industry Technology, **KIMET, ***Thermvac.co.

Abstract The influences of cooling pressure of quenching process on the mechanical properties such as hardness, impact endurance and anti-thermal fatigue behaviour of STD61 steel were investigated. The specimens were heat-treated using a vacuum furnace in which they were austenitized at 1,030°C for 1hour under the pressure of 10^{-3} torr and cooled with quenching gas of various pressure, i.e. 1, 2 and 6 bar. According to the observation on the specimens prepared with quenching from austenizing temperature, the mechanical properties of the samples with higher quenching pressure were better than those of prepared at lower quenching pressure. The samples prepared with high quenching pressure showed the more homogeneous microstructure with finer carbides. The size of carbides such as VC and (Fe, Cr)C in quenched specimens decreased with increasing gas quenching pressure. It is considered that the rapid cooling with pressure may restrict the formation and growth of carbide.

(Received September 29, 2016; Revised October 4, 2016; Accepted October 14, 2016)

Key words : STD61, Austenitize, Gas quenching, Anti impact property, Anti thermal property

1. 서 론

STD61은 고온영역에서의 열피로 저항성 향상을 위하여 Cr, Mo, V 등의 원소를 첨가한 대표적인 열간 금형강종으로 온열간 단조용, 다이캐스팅용 소재로 사용되고 있다. 열간 금형강은 균질화, 열간단조, 어닐링, 오스테나이트화 열처리(austenitization) 및 담금질(quenching), 뜨임(tempering) 등의 열처리 공정을 통해 조직을 미세화하고 있다. 열간 금형강의 미세조직과 기계적 성질에 주요한 역할을 하는 것으로 알려진 오스테나이트화 열처리, 담금질, 뜨임 공정들에 관해서는 많은 연구 결과들이 보고되고 있다[1, 2]. 특히 열간금형강에서 발생하기 쉬운 냉각, 수축에 의한 열피로수명의 저하 혹은 열 균열(heat check) 등의 불량원인의 조기 발생을 억제하기 위한

열처리 공정 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 열피로특성과 히트체크 및 크랙에 대한 저항성 향상을 위해서는 금형강의 고온강도와 인성을 향상시켜야 하는데 금형강의 조직을 미세한 마르텐사이트로 형성시켜서 경도와 충격인성 및 고온강도를 향상시켜야 하는 것으로 알려져 있다. 특히 오스테나이트화 열처리와 템퍼링 공정 이외의 균질화와 소둔(annealing)과 같은 열처리공정을 통해 금형강에 첨가된 합금원소들과 탄소가 결합된 탄화물을 미세하게 형성하여 경도 및 충격인성 등의 최종 기계적 성질을 향상시키고 있다고 보고하였다[3, 4].

이와 같이, 균질화와 소둔 공정 그리고 표면처리가 금형강의 물성에 미치는 영향에 대한 연구결과들은 일부 보고되고 있으나 그 중요성에 비교하여 매우 부족한 상태이다[5-10]. 특히, 담금질 시 가스켄칭

[†]Corresponding author. E-mail : kimoon@kitech.re.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

압력에 따른 조직 및 충격, 열피로특성의 변화에 대해서는 자세히 보고된 바 없다. 장비사정이 열악한 국내의 경우, 53 HRC 이상의 담금질 직후 경도를 요구할 시에는 1,030°C에서 오스테나이트화 열처리 후 2 bar 이상의 가스퀀칭 압력으로 진행하고 경도를 얻을 수 있는 적절한 뜨임온도에 의해 처리하고 있는 것으로 보고되고 있다. 이 경우 경도는 우수하지만 내충격이 나빠 수명이 저하될 수밖에 없는 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 STD61 열간 금형강의 담금질의 중요성을 확인하고자 가스퀀칭 압력에 따라 기지조직과 그에 따른 경도, 충격 그리고 열피로특성의 변화를 조사해 보고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 STD61 열간 금형강은 Table 1과 같은 화학적 조성을 나타낸다. 금형강의 소입공정은 소입후 요구 경도인 53 HRC 이상을 달성하기 위해 1,030°C에서 1시간 동안 오스테나이트화 열처리 후 1 bar에서 6 bar까지의 가스퀀칭 압력으로 담금질을 진행하였다. Fig. 1은 Ipsen 社の 열처리 시뮬레이터를 이용하여 STD61 30 L×30 W×30 H 크기의 시편에 대해 53 HRC의 경도를 얻을 수 있는 열처리조건을 모사한 결과이다. 그림에서 명시되듯이 균일한 열처리를 위해 600°C에서 30분, 850°C에서 30분 유지후 최종적으로 1,030°C에서 1시간 오스테나이트화 열처리 하도록 되었다. 이후

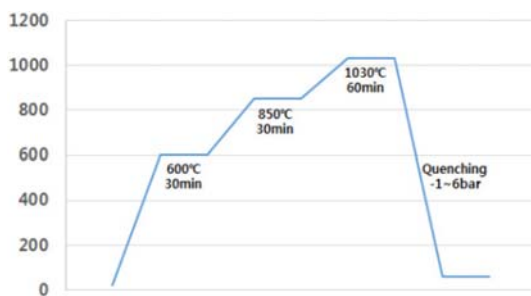


Fig. 1. Schematic diagram showing quenching for a STD61 hot-work tool steel.

2 bar 이상의 가스퀀칭 압력을 요구하는데, 본 연구에서는 가스퀀칭 압력을 비교하기 위해 1, 2, 4, 6 bar의 압력별로 실험을 진행하였다. 이와 더불어 오스테나이트화 온도에서 시편을 1시간 유지하고 열원을 제거한 후, 진공상태에서 로냉한 시편은 0 bar로 표시하여 함께 비교하였다. 위의 모사 결과에서 1,030°C의 온도는 기존에 보고된 열간금형강의 최적 조건[2]과 유사하였다. 미세조직 관찰 및 경도 측정용 시편은 담금질된 시편에서 약 30 L×30 W×10 H 크기로 가공하였다. 단면조직은 기계연마기를 사용하여 ~2000 ϕ grid까지 연마하고 경면연마를 진행하여 5% nital 용액에 15초간 예칭한 후 광학현미경과 주사전자현미경(FEI, NNS450)을 이용하여 시편의 기지조직과 탄화물을 관찰하였다. 기지조직의 경도는 로크웰경도기를 이용하여 5 mm 간격으로 측정하여 경도 균일도를 확인하였다. 그리고 열처리 시편의 내구성 평가를 위해 충격실험을 진행하였다. 이때, 시편에 대한 충격은 1,000 mm의 일정 높이에서 50 N의 하중을 지닌 추를 자유 낙하시켜 발생시켰다. 기본적으로 100회 충격시험후 변형량을 측정하여 내구성을 평가하였으며 2 mm 이상 변형이 발생하였거나 파손시 실험을 중단하고 가해진 충격 회수를 명시하고자 하였다. 충격시편은 Fig. 2a와 같이 10 Φ ×20 H 크기의 원통형으로 채취하여 자체 제작한 반복 충격시험기에 의한 내구성 평가를 진행하고, 열피로 특성은 Fig. 2b의 10 Φ ×60 H 크기의 원통형으로 채취하여 고주파 가열기를 이용하여 고온에 반복 노출시험을 진행하였다. 열피로 시험은 기존의 고주파를 이용한 피로시험[2]과 유사하게 진행하였다. 다만 열을 인가시 600°C보다 높은 약 650~700°C의 온도로 가열하여 수 초간 노출하였다가 급수를 이용한 냉각으로 200회 반복 시험을 진행하였다. 열피로특성은 반복된 회수에 따라 시편의 길이, 직경의 변형률을 비교 분석하였다. 충격 및 열피로특성 시험편의 변형정도는 디지털 버니어캘리퍼스를 이용하여 소수점 둘째자리까지 측정하였다.

Table 1. Chemical composition of STD61 used in the present study (wt.%)

	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Fe
STD61	0.38~0.42	4.50~5.50	1.00~1.50	0.80~1.20	0.82~1.20	<0.50	Base

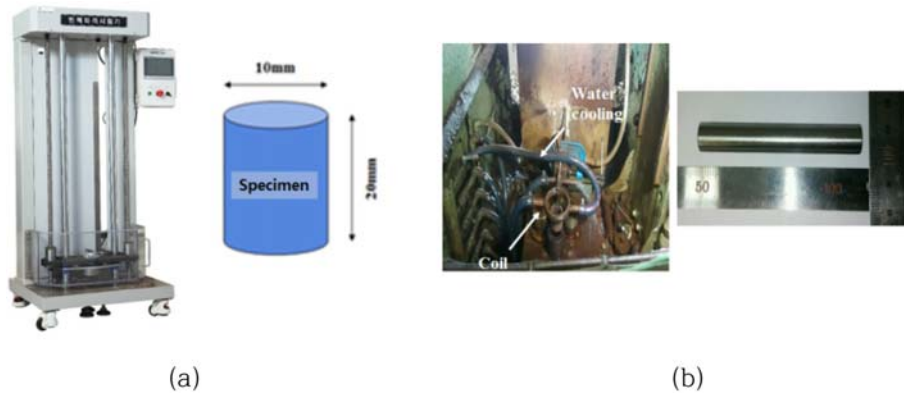


Fig. 2. Tester and cylindrical specimen used for (a) impact and (b) thermal fatigue test.

Table 2. Conditions of Impact test

	Factor
Height	1000 mm
Load	63.7 kN/mm ² (50 N)
Fall type	Free fall
Fall count	100 cycle

3. 결과 및 고찰

가스퀀칭 압력에 따른 열처리시편의 조직을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 b는 열원을 제거하고 진공상태에서 로냉한 시험편을 0 bar로 표기하고, c 부터 e는 가스퀀칭 압력에 따라 1 bar, 2 bar, 6 bar

를 순차적으로 나타낸 것이다. 가스퀀칭 압력이 높아짐에 따라 입계 탄화물의 양이 감소된 미세하고 균일한 조직이 관찰되었다. 이는 가스퀀칭 압력이 높을수록 빠른 냉각속도에 의해 탄화물의 생성이 억제되고 마르텐사이트 조직이 형성 되는 것으로 사료 된다[1-3]. 그에 따라 Fig. 4의 그래프와 같이 1 bar의 가스퀀칭 압력으로 냉각되어 약 49 HRC의 경도를 가진 시편이 가스퀀칭 압력이 높아짐에 따라 경도가 증가하면서 6 bar 냉각시에 약 53 HRC 이상으로 약 10% 이상 경도가 향상되는 것을 확인하였다.

광학적으로 분석이 어려운 단면조직 중 탄화물 등의 분포를 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM) 분석을 진행하였다. Fig. 5는 Fig. 3의 열처리시편에

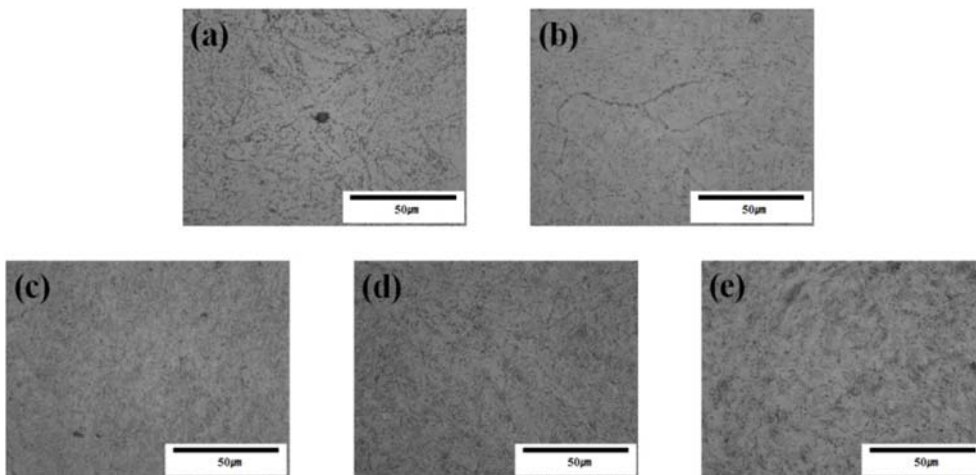


Fig. 3. Optical images of specimens (a) as-annealed and (b) 0bar at 1,030°C followed by cooling to 60°C with various quenching pressure: (c) 1 bar, (d) 2 bar, and (e) 6 bar.

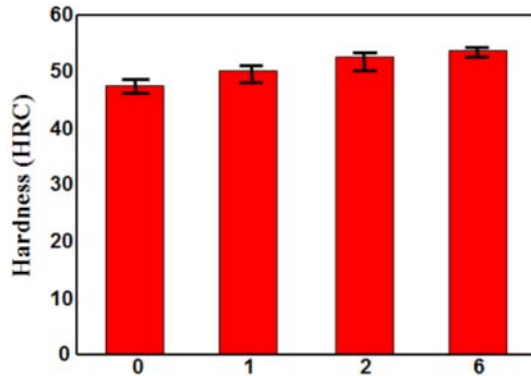


Fig. 4. Surface hardness value of specimens quenched at 1,030°C followed by cooling to 60°C with various gas quenching pressure.

대한 SEM 분석 결과이다. Fig. 5의 영문표식은 가스 압력과 분석 배율을 나타내는 것으로 영문-1은 5,000배, 영문-2는 20,000배를 나타내는 것이다. 가스퀀칭 압력이 증가하면서 입계의 검게 식각된 구형 탄화물의 크기가 미세해지는 것을 확인하였다. Fig. 5에서 (a) 사진은 기존에 보고된 결과와 같이 오스테나이트화 열처리 후 공냉한 시편에서 나타나는 페라이트 기지에 미세한 탄화물 입자가 분포된 조직을 나타내고[11], (b) 사진에서는 결정내에 탄화물들이 관찰되는 베이나이트와 탄화물이 관찰되지 않는 마르텐사이트로 구성되어진 것으로 나타났다[1]. 반면, 오스테나이트화 열처리 후 냉각을 위한 가스퀀칭 압력이 증가하면서 템퍼링되지 않은 마르텐사이트(어두운 부분) 상의 형성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 로냉시편에서는 500 nm 정도의 탄화물이 분포하고 있었지만 압력이 증가함에 따라 100 nm 이하 크기의 구형 탄화물이 관찰되었다. 이 구형탄화물은 Fig. 6의 EDS 분석결과 VC 탄화물이었으며, 사각형의 입자들은(Cr, V) 탄화물임을 알 수 있었다. 결국 가스퀀칭 압력 즉, 냉각속도가 빠를수록 2 bar 이상에서 냉각된 시편에서 마르텐사이트조직이 형성되고 탄화물이 미세해지면서 경도가 높아지는 것을 확인하였다[1, 11].

내충격시험 결과는 Fig. 7, 8과 같이 분석되었다. 내충격시편에 대한 반복타격시험 결과로 모재에서는 시험 전, 후에 약 0.02 g의 변화가 있었지만 열처리 시편에서는 무게변화가 발생하지 않았다. 즉, 반복타

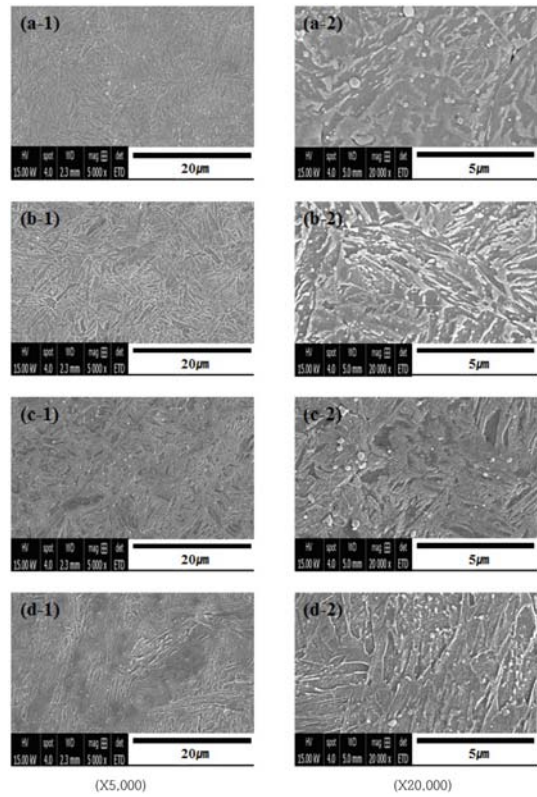


Fig. 5. SEM image of specimens quenched at 1,030°C followed by cooling to 60°C with various gas quenching pressure of (a) 0 bar, (b) 1 bar, (c) 2 bar and (d) 6 bar.

격에 의한 시편의 파단 발생은 없는 것으로 관찰되었다. 반면, 반복타격시험을 통해 열처리 후 가스퀀칭 압력에 따른 반복충격시험편의 길이 변형률은 0.5에서 0.04로, 직경 변형률은 -0.5에서 -0.03으로 분석되었다. 내충격 특성과 경도와 상관관계를 Fig. 8에 정리하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 시편의 경도가 증가하면서 충격시험에 의한 변화량은 감소하는 경향을 보였다. 특히 베이나이트량이 급격히 감소하고 마르텐사이트로 변화가 관찰된 가스퀀칭 압력 2 bar 이상의 시편에서는 충격에 의한 시편의 변화량이 유사함을 확인하였다. 이는 기지조직 내에 마르텐사이트가 치밀하게 분포하여 충격에 대한 충분한 저항성을 확보하였기 때문인 것으로 사료된다.

내충격성과 더불어 STD61 강종의 중요한 내구성 중 하나인 열피로특성 실험을 길이 60 mm, 직경 10 mm의 크기로 평가를 진행하였다. Fig. 9는 열충격 실험 전, 후의 시편사진이다. 그 결과, 소입후 냉

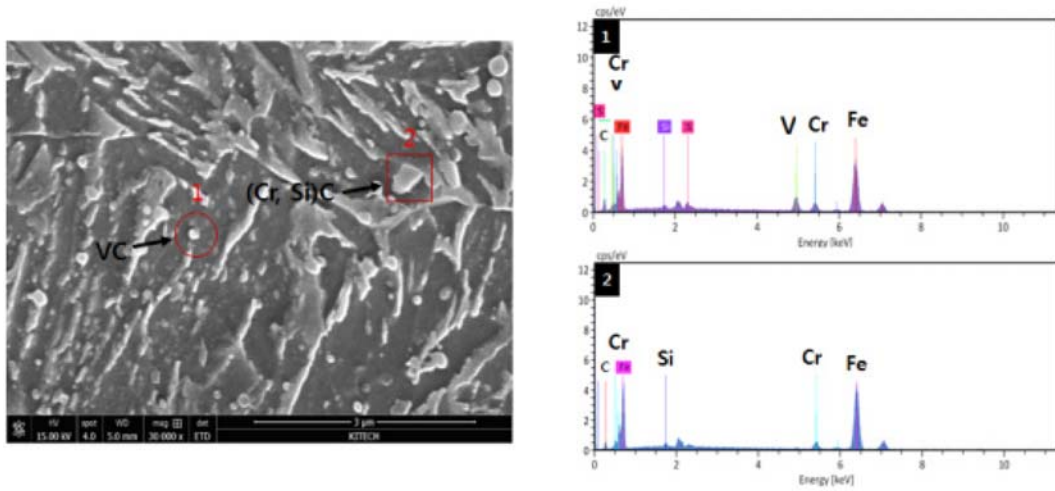


Fig. 6. SEM image and EDS spectra of specimen cooled by furnace cooling.

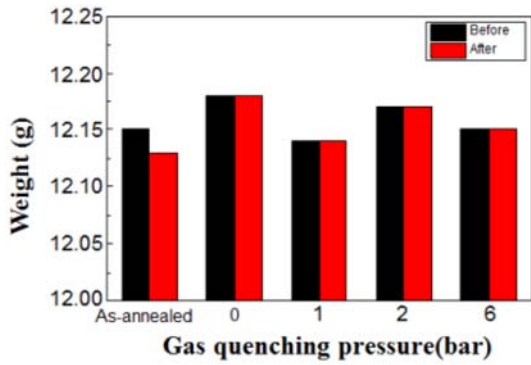


Fig. 7. Weight change rate of specimens measured by Impact tester.

각압력이 증가함에 따라 변형이 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 시편의 길이, 직경을 측정한

결과에서도 확연히 알 수 있다. 모재 시편의 실험 전, 후의 모습을 보면 검게 그을린 부분이 심하게 부풀어 오르고 휘는 모습을 관찰할 수 있다. 이는 열에 의해 수축, 팽창이 발생하면서 변형이 크게 발생한 것으로 사료된다. 시편의 변형은 냉각압력이 높을수록 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 공정 조건에 따라 열처리한 시편의 내열실험 전, 후의 시편 길이와 직경변화에 대한 변형률을 측정한 결과로 가스퀀칭 압력이 높아짐에 따라 시편의 길이 변형률은 약 0.89에서 0.21로 1/4배 감소하였다. 시편의 직경 변형률은 as-annealed 시편에서는 약 0.03이었지만 6 bar의 압력에서 가스퀀칭한 시편에서 최소변화인 약 0.01인 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터, 담금질시 빠른 냉각을 통해 미세한 탄화물과 결정립

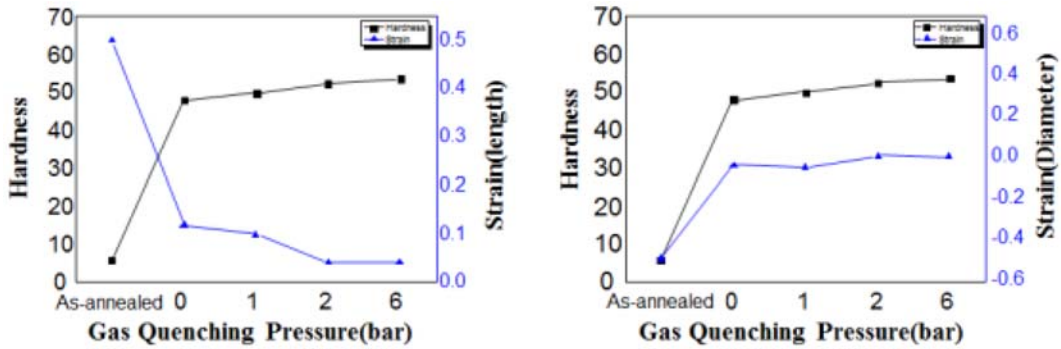


Fig. 8. The strain of length and diameter of specimens with hardness of specimens measured by Impact tester.

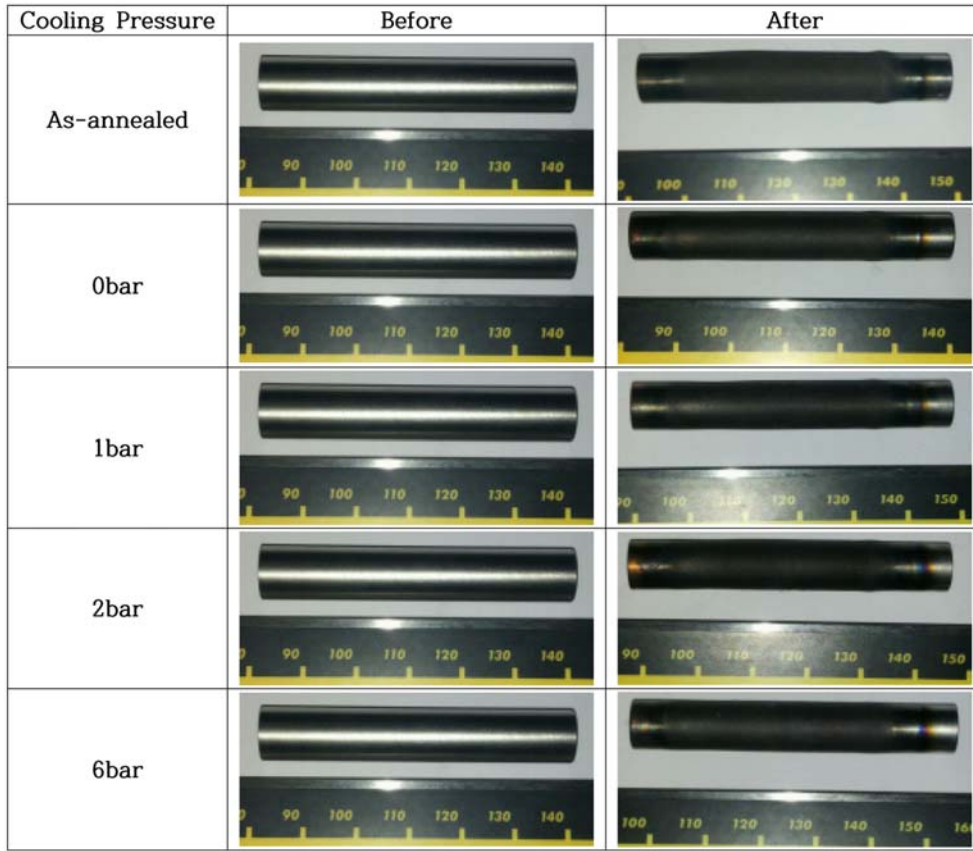


Fig. 9. Images of specimens tested by anti-thermal fatigue test.

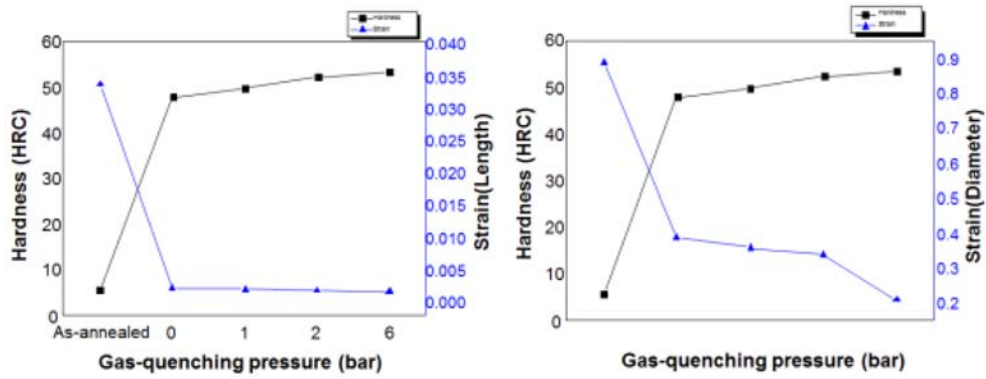


Fig. 10. The strain of length and diameter of specimens with hardness of specimens measured after anti-thermal fatigue test.

을 가지는 조직이 우수한 내열충격특성을 보이는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기지조직 내에 마르텐사이트가 미세할수록 시편의 경도는 향상되었으며, 6 bar 이상의 가스켄칭 압력에서 시험편의 경도는 약 53 HRC 이상으로 관찰되었다.

2. 가스켄칭 압력에 따른 담금질된 시험편들의 주사전자현미경 관찰결과, 가스켄칭 압력이 높아짐에 따라 베이나트 조직이 감소하고 마르텐사이트의 두께가 가늘어지면서 미세화되는 것을 확인하였다. 그에 따라 시편의 경도가 증가하는 경향을 보였다.

3. 또한, 가스켄칭 압력 증가에 따라 기지내의 탄화물의 크기는 감소하며 균일하게 분포하는 것으로 관찰되었다. 특히 구형 탄화물은 VC 탄화물로 분석되었으며 그 크기는 100 nm 이하로 관찰되었다.

4. 100회 반복된 충격시험에서 열처리되지 않은 원소재의 경우에는 시편에 파단이 발생하면서 일부가 떨어져 나가고, 그에 따라 무게변화가 발생하였다. 반면 열처리된 시편들에서는 무게 변화는 관찰되지 않았다. 가스켄칭 압력이 높을수록 시편의 길이 및 직경의 변화가 최소화 되는 것을 확인하였다.

5. 열피로특성 분석에서도 가스켄칭 압력이 높을수록 온도변화에 대한 길이, 직경의 변형량이 작아지는 것을 확인하였다. 결국 미세한 기지조직과 탄화물 분포가 내열충격 특성에 우수한 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 산업핵심기술개발사업(과제번호_10048725)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 밝힙니다.

References

1. 박규진 : 열처리공학회지, 제26권 제2호 (2013).
2. Deepak Kundalkar : Materials Science & Engineering A **651** (2016) 391-398.
3. Andrej Skumavc : Surface & Coating Technology **285** (2016) 304-311.
4. I. Souki : Procedia Engineering **10** (2011) 631-637.
5. B. Hoffmann : Materials Science & Engineering A **234-236** (1997) 707-710.
6. P. Michaud : Acta Materialia **55** (2007) 4877-4889.
7. Zhi-xin Jia : International Journal of Fatigue **78** (2015) 61-71.
8. Dalong Cong : Materials and Design **55** (2014) 597-604.
9. Dalong Cong : Optics and Lasers in Engineering **54** (2014) 55-61.
10. Xin Tong : Applied Surface Science **271** (2013) 373-380.
11. 김정근 : 금속현미경 조직학, 도서출판 골드 (1999).