J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 32, No. 5, October 2016, pp. 160~165 ISSN 1229-4845(Print)·2287-4666(Online)
Journal of the Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers http://Journal.kstle.or.kr

DOI http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2016.32.5.160

냉각공정에 따른 AISI 4140 강의 표면 및 트라이볼로지 특성

조학래[1] · 이상돈[2] · 손정호[2] · 정구현[1,†]

[1]울산대학교 기계공학부, [2]현대중공업 엔진기계연구소

Surface and Tribological Characteristics of Air-cooled and Oil-cooled AISI 4140 Steel

Hak-Rae Cho[1], Sang Don Lee[2], Jung Ho Son[2] and Koo-Hyun Chung[1,†]

[1]School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea
[2]Engine & Machinery Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Korea
(Received August 6, 2016; Revised October 10, 2016; Accepted October 15, 2016)

Abstract – AISI 4140 steel is widely used in various mechanical components owing to its superior mechanical properties. Surface hardening techniques are often used to further improve the properties, particularly for applications with moving components. The aim of this research is to understand the effect of heat treatment process on surface properties and tribological characteristics of AISI 4140 steel. In this work, we prepare two different AISI 4140 steel specimens- one cooled by air and one by oil- and determine surface properties such as surface topography and roughness using a confocal microscope. We also observe the cross-sections of the specimens using a scanning electron microscope to understand the difference in the material structure. In addition, we assess the hardness with respect to the distance from the surface using a micro-Vickers hardness tester. After characterizing the surfaces of the specimens, we investigate the wear characteristics of the specimens under hydrodynamic lubrication. The results show the presence of grooves on the surface of the oil-cooled specimens. It is likely that such grooves are formed during the cooling process using the oil. However, we observe no other significant differences in the surface properties of the specimens. The wear test results show the occurrence of severe wear on the oil-cooled specimens, which may be due to the groove formed on the surface. The results of this work may be helpful to improve surface properties using surface hardening techniques from a tribological perspective.

Keywords – air cooling(공냉), oil cooling(유냉), surface roughness(표면거칠기), wear(마모)

1. 서 론

AISI 4140강은 강도, 내마모성, 인성 등과 같은 기계적 물성이 상대적으로 우수한 것으로 제시되고 있으며, 다양한 기계부품뿐만 아니라, 금속성형을 위한 다이 및 주조 틀과 같이 내마모성을 요구하는 부품 등에 사용되고 있다. 또한, AISI 4140강의 표면 특성을 더욱 향상시키기 위해서는 코팅, 피닝, 열처리, 질화법 등과 같은 다양한 표면처리방법이 적용되고 있다[1-4]. 특히, 질화법은 가장 오래된 방법 중 하나로써, 표면경도, 기계적 물성, 내마모성, 내부식성, 피로수명 등을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있으며[5, 6], 염욕질화, 플라즈마 질화와 같은 다양한 질화방법 및 각 처리방법에 따른 강의 표면특성 개선에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다[7-9]. 또한, 열처리 방법, 온도, 냉각속도 등이 표면 특성이나 미세 구조, 기계적 물성에 끼치는 영향 등에 대한 연구도 다양하게 제시되고 있

†Corresponding author : khchung@ulsan.ac.kr
Tel: +82-, Fax: +82-

다[10-11]. 예를 들어, 강의 구조는 냉각 속도에 달라질 수 있으며, 특히 마이크로 구조를 형성할 경우, 강도와 연성을 모두 증가시킬 수 있다는 결과가 제시되고 있다[12]. 그러나, 열처리 공정에 관한 대부분의 연구는 공정 개발 및 소재 자체의 물성 분석 등에 주로 치우쳐 있으며, 시스템적 특성인 마찰 및 마모 관점에서의 연구[13-15]는 상대적으로 많이 수행되지 않고 있다. 그러므로, AISI 4140강의 표면 특성을 마찰 및 마모 관점에서 개선하고 보다 많은 응용 분야를 창출하기 위해서는 보다 폭넓은 이해와 연구가 필요하다.

본 연구에서는 질화 처리 후 서로 다른 냉각 과정을 거친 AISI 4140 강의 표면 물성과 이에 따른 마모 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여, 공기와 오일을 이용한 냉각 공정을 거친 두가지 종류의 AISI 4140 강 시편을 준비하였다. 공초점 현미경(confocal microscope) 및 마이크로 비커스(micro-Vickers) 경도계 등을 이용하여 서로 다른 두 냉각 매체 사용에 따른 시편의 표면 특성 및 기계적 물성의 차이를 이해하고자 하였으며, 단면의 조직도 함께 비교하였다. 또한, 유체 윤활 상태에서 발생하는 마모 현상을 실험적으로 관찰함으로써 냉각 매체에 따른 시편의 표면 특성 변화가 마모 현상에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 실험 시편

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 사용된 강 소재는 AISI 4140이었으며, 시편들은 모두 동일한 가공 공정을 통하여 제작되었다. 그러나 질화 처리 후 냉각공정에서는 서로 다른 냉각 매체인 공기와 오일이 이용되었다. 유체윤활 상태에서의 마모 특성을 평가하기 위하여, 시편들은 Fig. 1(a)에 제시된 바와 같이, 부싱(bushing) 형태로 제작되었다. 오일을 이용하여 냉각한 시편의 경우, 좀 더 밝은 색을 띠고 있는 것을 알 수 있다. 표면 및 물성 분석을 위해서는 시편을 절단하여 이용하였으며, 절단된 시편들은 마운팅 및 폴리싱된 후 단면 조직 관찰에 이용되었다.

(a) (b)

Fig. 1. Photographs of (a) air- and (b) oil-cooled specimens.

2-2. 실험 방법

제작된AISI 4140 강 시편의 표면은 공초점 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 공초점 현미경 데이터로부터 중심선 표면 거칠기 (R_a)를 얻어 냉각 공정에 따른 표면 특성 비교에 이용하였다. 특히, 표면 거칠기는 측정 영역의 크기에 따라 다르게 나타날 수 있음으로 고려하여, 다양한 배율에서 얻은 표면 거칠기를 서로 비교하고, 두 표면의 차이를 체계적으로 이해하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 대물렌즈 배율을 각각 10배, 50배, 150배로 변화시켰다. 또한, 냉각매체에 따른 냉각 속도의 변화는 질화층의 두께와 조직 등에 영향을 미칠 것으로 예상되었으므로, 주사전자현미경(scanning electron microscope)를 이용하여, 시편의 단면 조직을 관찰하였다. 시편의 기계적 물성 분석에는 마이크로 비커스 경도계가 이용되었으며, 표면과 단면의 경도를 함께 분석하였다. 중심선 표면 거칠기와 경도는 5곳 이상의 서로 다른 위치에서 측정하여 비교하였다. 또한, energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) 분석을 통하여 냉각공정 차이에 따른 표면의 화학적 특성 차이를 이해하고자 하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이, 부싱 형태의 시편을 이용하여, 실제 마모 실험을 수행하였다. 해당 소재의 응용 분야를 고려하여, 유체 윤활 상태에서의 마모 특성을 평가하였으며, 작용하중과 미끄럼 속도는 47 kN과 1.5 m/s로 설정하였다. 각 시편의 실험 후 표면은 공초점 현미경을 이용하여 분석하였으며, 마모 정도를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 표면 특성

Fig. 2(a)와 (b)는 각각, 서로 다른 3개의 배율

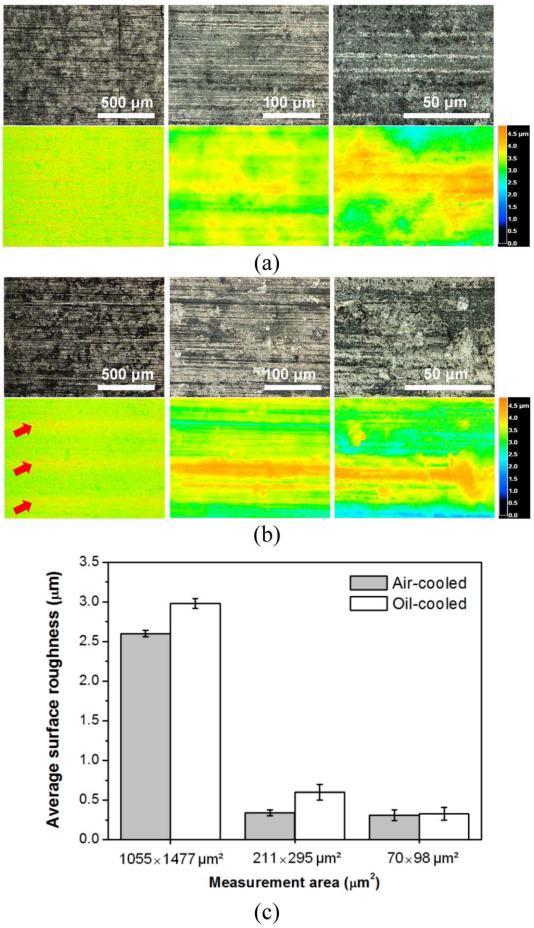

Fig. 2. Confocal microscope images (top) and surface topographies (bottom) of (a) air- and (b) oil-cooled specimens, and (c) comparison of surface roughness of the specimens.

에서 관찰한 공냉(air cooling) 및 유냉(oil cooling) 시편의 대표적인 공초점 현미경 이미지와 2차원 topography를 나타낸다. Fig. 3(a)와 (b)에 제시된 현미경 이미지들로부터 가공 공정에 따른 패턴이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 2차원 topography로 부터, 두 시편의 표면 차이를 알 수 있는데, 공냉 시편의 경우에는 비교적 표면의 형태가 고른 것으로 나타났으나, 유냉 시편의 경우 Fig. 3(b)에 화살표로 표시한 바와 같이 수백 마이크로미터 정도의 간격으로 수 마이크로미터 정도의 높이를 가지는 그루브(groove)가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 그루브들은 시편 전체

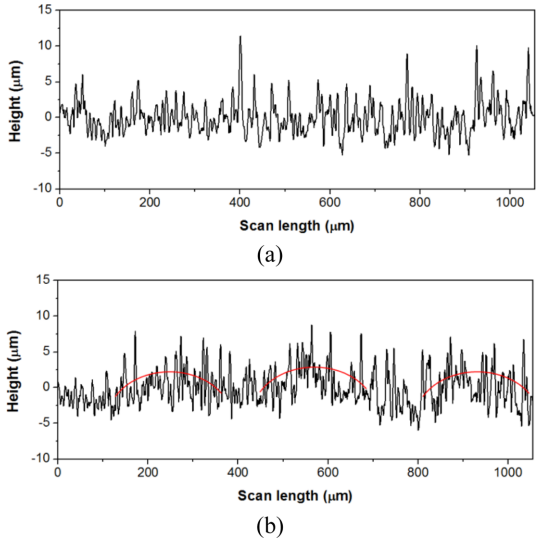

Fig. 3. Cross-sectional height profiles of (a) air- and (b) oil-cooled specimens.

에 걸쳐서 형성되어 있는 것으로 나타났다. 그러나, 상대적으로 높은 배율에서 관찰할 경우에는 반복적으로 나타나는 그루브 형성을 명확하게 관찰하기 힘든 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 명확한 표면 특성의 이해를 위해서는 다양한 배율에서 관찰하는 것이 유용함을 알 수 있다. 서로 다른 5곳의 위치에서 얻은 평균 표면 거칠기 값은 Fig. 3(c)에 비교하여 제시하였다. Fig. 3(c)에 제시된 에러 바는 표준 편차를 의미한다. 공냉 및 유냉 시편의 표면 거칠기는, $1055 \times 1477\ \mu m^2$ 측정 면적에서 각각 $2.60 \pm 0.04\ \mu m$과 $2.98 \pm 0.06\ \mu m$으로 나타났으며, $211 \times 295\ \mu m^2$의 측정 면적에서, 각각 $0.34 \pm 0.04\ \mu m$, $0.6 \pm 0.1\ \mu m$으로 나타났다. 유냉 시편의 표면 거칠기는 공냉 시편에 비하여, $1055 \times 1477\ \mu m^2$와 $211 \times 295\ \mu m^2$의 면적에서 각각 15%, 75% 정도 큰 것으로 나타났다. 유냉 시편의 표면 위에 존재하는 그루브들은 표면 거칠기의 상승을 유발할 것이므로, 유냉 시편의 표면 거칠기가 더 큰 것이 타당하며, 그루브의 폭을 고려할 때, $211 \times 295\ \mu m^2$ 영역에서 표면 거칠기 값의 상승에 더 크게 기여함을 알 수 있다. 그러나, $70 \times 98\ \mu m^2$의 범위에서 결정된 두 시편의 표면 거칠기는 오차 범위 내에서 서로 비슷함을 알 수 있으며, 시편의 표면 특성을 적절하게 반영하지 못하

고 있음을 알 수 있다. 표면 형상 및 거칠기를 보다 명확하게 측정하기 위해서는, 다양한 배율에서 체계적으로 관찰하는 것이 요구됨을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 공초점 현미경 데이터로부터 얻은 공냉 및 유냉 시편의 2차원 단면 프로파일을 나타낸다. 두 시편의 2차원 단면 프로파일을 비교할 때, 공냉 시편의 표면에는 비교적 균일한 가공 흔적 등이 형성되어 있는 것을 알 수 있으나, 유냉 시편의 표면에는 가공흔적과 더불어, Fig. 2(b)에 화살표로 제시한 그루브들이 형성되어 있는 것을 명확하게 관찰할 수 있다. 이와 같은 그루브들은 Fig. 3에 붉은 색 호로써 표시하였다. 결론적으로, 두 시편의 냉각과정 차이에 의하여, 표면의 특성이 달라진 것으로 예상되며, 본 연구에서 사용된 냉각공정의 경우에는 오일을 매체로 사용하였을 경우, 표면에 일정한 그루브를 형성시킴을 알 수 있다. 이와 같은 그루브의 존재는 해당 시편의 마모 특성에 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다.

일반적으로, 유냉의 냉각 속도가 공냉에 비하여 빠르며, 냉각속도에 차이는 표면층의 두께 및 조직, 기계적 물성의 차이 등을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 표면 거칠기 분석과 더불어, 각 시편의

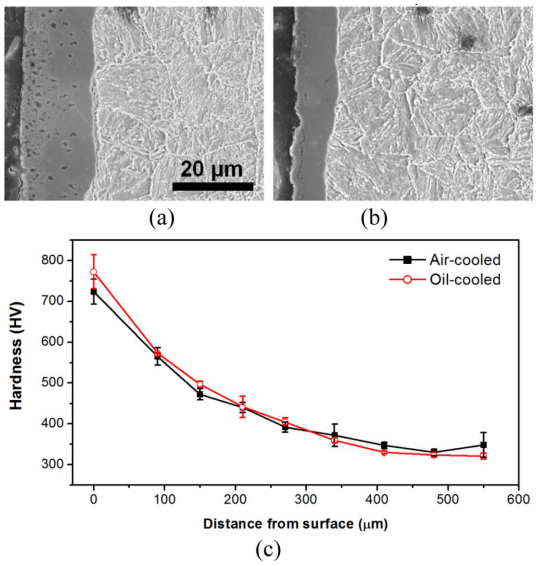

Fig. 4. Scanning electron microscope images of the cross-sections of (a) air- and (b) oil-cooled specimens, and (c) hardness with respect to distance from the surface.

단면 조직을 분석하고, 기계적 물성의 비교를 위하여 경도를 측정하여 비교하였다. Fig. 4(a)는 이와 같은 결과를 나타낸 것으로써, 두 시편의 단면에 대한 대표적인 주사전자현미경 이미지를 나타낸다. Fig. 4(a)에 제시된 바와 같이, 공냉 시편의 경우 유냉 시편에 비하여 약 2배 정도 두꺼운 표면층을 형성하고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 적용된 냉각 공정의 경우, 공기를 냉각매체로 사용할 경우, 보다 두꺼운 표면층을 형성할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 4(a)에 제시한 결과로부터 냉각 속도 차이에 의한 조직의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 표면층의 두께 차이는 마모의 진전에 영향을 미칠 것으로 기대된다.

두 시편의 표면과 표면으로부터의 거리에 따른 경도 값의 변화는 Fig. 4(b)에 요약하여 제시하였다. 표면 경도는 일반적으로, 최외각 표면에 존재하는 산화층, 가공변형층 등에 영향을 받을 뿐만 아니라, 표면에 존재하는 요철의 영향을 받기 쉬운데, 특히 열처리된 시편의 경우 표면 경화층의 영향이 지배적으로 나타날 것으로 예상되었다. 공냉 처리된 시편의 표면 경도는 Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이, 유냉 처리된 시편에 비하여 약 7% 정도 작은 것으로 나타났다. 그러나 측정 오차를 고려할 때, 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한, 표면으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 두 시편의 경도는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 유냉 시편이 공냉 시편에 비하여 상대적으로 낮은 경도를 가지는 것은 비교적 짧은 냉각 시간에 기인하는 것으로 여겨지나 그 차이는 비교적 크지 않은 것으로 결론지을 수 있다. 이와 같은 결과를 통하여, 두 시편의 냉각 매체 차이에 따른 경도차이는 크지 않았던 것으로 결론지을 수 있으며, 경도 차이에 의한 마모 특성의 차이는 상대적으로 작을 것을 예상할 수 있다.

열처리 방식에 따라 표면의 화학적 성분 차이가 발생하는지 여부를 판단하기 위하여 EDX를 이용하여 각 시편의 표면에서의 화학 성분 분석을 파악하였다. 분석 결과는, Fig. 5에 제시한 바와 같이, 공냉 시편의 경우, 염욕질화 과정에서 형성될 수 있는 K, Na, Ni 등의 성분이 검출되었으나 유냉 시편에서는 해당 성분이 검출되지 않았음을 알 수 있다. 이는 공냉 시편의 경우 표면 질화층의

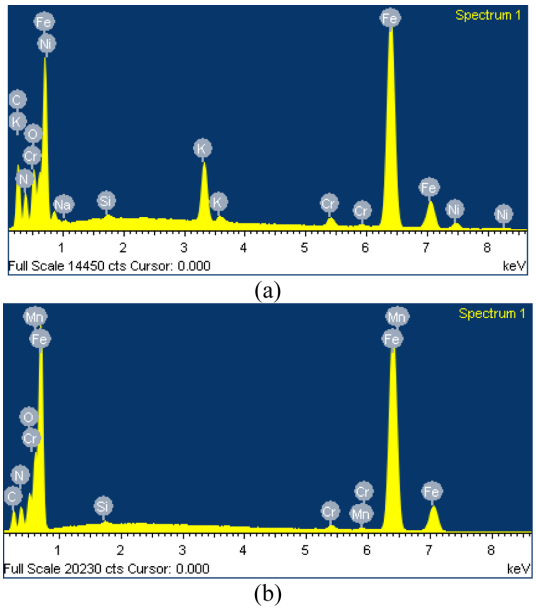

Fig. 5. Spectrums obtained by energy-dispersive X-ray spectrometer of (a) air-cooled and (b) oil-cooled specimens.

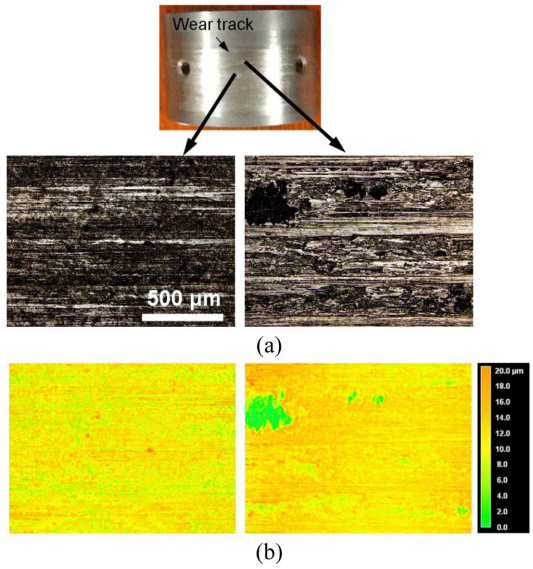

Fig. 6. (a) Photograph, confocal microscope image and (b) surface topographies of oil-cooled specimen after the test.

두께가 더 두꺼웠으므로, 해당 성분이 보다 효과적으로 검출된 것으로 보여진다. 그러나, 두 시편 표면의 주된 성분은 비교적 잘 일치하는 것으로 판단되며, 오일 친화도와 같은 특성에는 큰 차이가 없음을 예측할 수 있다.

3-2. 마모 특성

본 연구에서는 부싱 형태의 시편을 이용하여 실제 작동조건에서 마모 실험을 수행하였으며, 동일한 조건에서의 실험 후, 각 시편의 표면에서 발생한 마모 정도를 비교하였다. 같은 조건에서의 실험 후, 공냉 시편의 표면에서는 마모를 거의 관찰하기 힘들었으나, 유냉 시편의 경우, 가혹한 마모가 발생한 것을 알 수 있었다. Fig. 6은 실험후 유냉 시편의 사진 및 공초점 현미경 이미지, 그리고 topography를 나타낸다. Fig. 6의 왼쪽에 제시된 공초점 현미경 이미지와 topography 측정 결과로부터, 실험 전에 형성되어 있던 그루브들이 제거되었음을 알 수 있으며, Fig. 6의 오른쪽에 제시된 결과로부터 표면이 국부적으로 뜯겨 나가는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여, 유냉 시편의 마모 기구 및 진전을 예측할 수 있는데, 유냉 시편의 표면에 형성되어 있는 그루브들이 제거되며 마모 입자들이 발생하는 동시에 응착 마모가 주로 발생하는 것으로 생각된다. 이와 같은 마모는 유막의 파괴를 초래할 수 있으므로 상대적으로 높은 속도에서 작동하는 유체 윤활 상태에서 시편의 마모는, Fig. 6에 제시된 시편 사진과 같이, 급격하게 진전된 것으로 여겨진다. 특히, 그루브가 제거되면서 발생된 마모 입자들은 마모의 진전에 크게 기여할 것으로 예상된다.

이와 같은 결과로부터, 유냉 시편의 표면에 존재하는 그루브는 마모 특성에 심각한 영향을 미치는 것으로 생각된다. 냉각 공정 특히, 냉각 매체 종류에 따른 표면 그루브의 형성 정도는 공정 변수에 따라 영향을 받을 수 있으므로 본 실험을 통하여 얻어진 결과를 일반화시킬 수는 없을 것이다. 그러나, 냉각 공정에 따라 시편의 표면 상태가 영향을 받을 수 있는 것은 분명하며, 보다 효과적인 공정 개발을 위해서는 체계적인 표면 분석이 요구되며, 특히, 상대운동 하는 부품의 경우 마찰 및 마모 특성 관점에서 평가하는 것이 필수적이라 여겨진다.

4. 결 론

본 연구에서는 질화 처리 후 공냉 및 유냉의 서

로 다른 냉각 과정을 거친 AISI 4140 강의 표면 특성의 차이와 마모 특성의 차이를 이해하고자 하였다. 표면의 특성 및 물성 분석을 위하여, 공초점 현미경, 주사전자현미경, EDX, 그리고 마이크로 비커스 경도계 등을 활용하였으며, 부싱 형태의 시편을 이용하여 유체 윤활 상태에서 마모 특성을 평가하였다. 표면 분석 결과, 공냉과 유냉 시편의 표면의 근본적인 차이가 관찰되지는 않았으나, 유냉 시편의 표면에는 냉각과정에서 형성된 것으로 여겨지는 그루브들이 관찰되었으며, 이들에 의하여 유냉 시편의 표면 조도가 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 유냉 시편의 표면에 형성된 그루브들은, 유냉 시편의 경도가 공냉 시편에 비하여 약간 컸음에도 불구하고, 실제 고속에서 상대 운동시 심각한 마멸을 초래할 수 있는 것으로 나타났다. 그러므로, 보다 효과적인 공정 개발을 위해서는 냉각 공정 변수들의 적절한 선정과 함께, 체계적인 표면 분석이 이루어 져야 할 것으로 생각된다. 특히, 이러한 분석과 평가들은 상대운동 하는 부품의 경우 필수적이라 여겨진다.

Acknowledgements

이 논문은 2014년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: NRF-2014R1A1A2058201).

References

[1] Nachum, S., Fleck, N. A., “The Microstructure and Mechanical Properties of Ball-Milled Stainless Steel Powder: The Effect of Hot-Pressing vs. Laser Sintering”, *Acta. Mater.*, Vol. 59, No. 19, pp. 7300-7310, 2011.

[2] Ren, X. D., Zhan, Q. B., Yang, H. M., Dai, F. Z., Cui, C. Y., Sun, G. F., Ruan, L., “The Effects of Residual Stress on Fatigue Behavior and Crack Propagation from Laser Shock Processing-Worked Hole”, *Mater. Design*, Vol. 44, pp. 149-154, 2013.

[3] Song, S. H., Choi, B. H., “Fatigue Characteristics and Fatigue Limit Prediction of an Induction Case Hardened Cr-Mo Steel Alloy”, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 361, No. 1-2, pp. 15-22, 2003.

[4] Kennedy, E., Byrne, G., Collins, D. N., “A Review of the Use of High Power Diode Laser in Surface Hardening”, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 155-156, pp. 1855-1860, 2004.

[5] Shen, Y. Z., Oh, K. H., Lee, D. N., “Nitriding of Steel in Potassium Nitrate Salt Bath”, *Scripta. Mater.*, Vol. 53, No. 12, pp. 1345-1349, 2005.

[6] Brooks, C. R., Principle of the Surface Treatment of Steels, Lancaster, Basel: Technomic Publishing Company, 1992. (ISBN 9780877627968)

[7] Ekinci, Ş., Akdemir, A., Kahramanli, H., “Modeling and Investigation of the Wear Resistance of Salt Bath Nitrided AISI 4140 via ANN”, *Surf. Rev. Lett.*, Vol. 20, No. 3-4, pp. 135033 1-10, 2013.

[8] Podgornik, B., Vižintin, J., Wänstrand, O., Larsson, M., Hogmark, S., Ronkainen, H., Holmberg, K., “Tribological properties of Plasma Nitrided and Hard Coated AISI 4140 Steel” *Wear*, Vol. 249, No. 3-4, pp. 254-259, 2001.

[9] Podgornik, B., Vižintin, J., “Wear Resistance of Pulsed Plasma Nitrided AISI 4140 and A355 Steel”, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 315, No. 1-2, pp. 28-34, 2001.

[10] Noh, S, Choi, B. K., Han, C. H., Kang, S. H., Jang, J., Jeong, Y. H., Kim, T. K., “Effects of Heat Treatments on Microstructures and Mechanical Properties of Dual Phase ODS Steel for High Temperature Strength”, *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 45, No. 6, pp. 821-826, 2013.

[11] Bekoz, N., Oktay, E., “Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Low Alloy Steel Foams”, *Mater. Design*, Vol. 51, pp. 212-218, 2013.

[12] Rasouli, D., Khameneh Asl, Sh., Akbarzadeh, A., Daneshi, G. H., “Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed Forging Steel”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 206, No. 1-3, pp. 92-98, 2008.

[13] Eshaghi, A., Ghasemi, H. M., Rassizadehghani, J., “Effect of Heat Treatment on Microstructure and Wear Behavior of Al-Si Alloys with Various Iron Contents”, *Mater. Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1520-1525, 2011.

[14] Kim, C. K., Lee, S., Jung, J. Y., “Effects of Heat Treatment on Wear Resistance and Fracture Toughness of Duo-Cast Materials Composed of High-Chromium White Cast Iron and Low-Chromium Steel”, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 37, No. 3, pp. 633-643, 2004.

[15] Filippov, M. A., Belozerova, T. A., Blinov, V. M., Kostina, M. A., Val’kov, E. V., “Effect of Heat Treatment of the Wear Resistance of High-Nitrogen Steels Subjected to Abrasive Wear”, *Met. Sci. Heat Treat.*, Vol. 48, No. 3-4, pp. 170-174, 2006.