

고경도 표면구현을 위한 UNSM과 버니싱 공정을 연계한 하이브리드 기계적 표면처리

길영욱*, 박상후**,#

*부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 기계공학부

Hybrid Mechanical Surface Treatment Technology via UNSM and Burnishing for Realizing High Surface Hardness

Yeong-Wook Gil*, Sang-Hu Park**,#

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 25 August 2023; received in revised form 04 September 2023; accepted 15 September 2023)

ABSTRACT

Diverse metallic parts should have high wear resistance. Therefore, to achieve an ultrawear-resistant surface for cast iron, we developed a new process that combines stick burnishing with ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM). Stick burnishing is a well-known process that creates a compressive residual stress through a work-hardening effect. The UNSM treatment refined the grain structure to increase the hardness and compressive residual stress. In this study, four types of specimens, UNSM alone and burnishing alone, and two combined treatments, UNSM-after-burnishing and burnishing-after-UNSM, were sequentially evaluated, and their surface hardness distributions were compared. This operation resulted in the best combination of mechanical surface treatments, the hardness was found to be 61.4% higher than that of the original cast iron material. We believe that this approach can be applied to a variety of mechanical components for highly functional local surface properties and ultra-wear resistance applications.

Keywords : Burnishing(버니싱), UNSM(나노결정미세화표면처리), Super-Wearproof Characteristics(초내마모성), Hybrid Surface Treatment(하이브리드 표면처리), Hardness(경도)

1. 서 론

일반적으로 기계시스템 작동시 반복된 기계부품 간의 마찰과 마모가 발생하여 장비에 진동과 소음을 유발시키고, 궁극적으로는 장비에 결함을 발생시켜 수명에 심각한 영향을 주게 된다. 특히 자동

차 엔진블록의 내부는 실린더와 피스톤의 반복된 마찰로 미세크랙이나 파손이 빈번하게 발생하게 되고 이로 인한 유지 및 보수비용이 증가되고 있다. 따라서 기계부품 표면에 내마모성을 향상시키기 위한 다양한 표면처리 공정기술이 연구되어 왔다^[1-2]. 특히 엔진블록과 같이 빠른 속도로 상대운동을 하는 기계부품은 피로파괴가 쉽게 발생하여 내마모성 소재 개발에도 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 피로수명 향상을 위한 기술은 방위산업 등

Corresponding Author : sanghu@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-1011

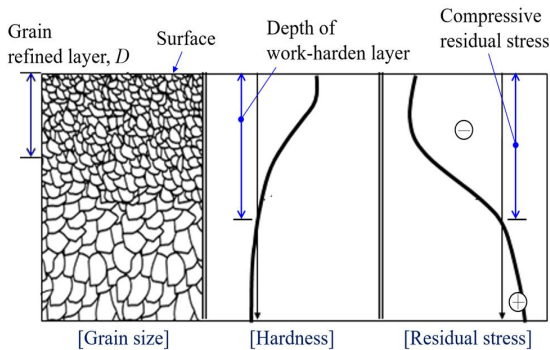


Fig. 1 Effects of mechanical surface treatment

에서는 핵심기술로 분류되고 있다^[3-5]. 피로수명 특성의 주된 영향부인 표면층의 기계적 특성 개선을 위한 표면공정기술이 다양하게 연구되어 왔다^[6-8].

그중에서도 공정이 비교적 간단한 기계적 표면개질(Surface modification) 방법인 피닝(Peening), 버니싱(Burnishing), 초음파 나노표면 개질기술(Ultrasonic nanocrystal surface modification, UNSM) 등에 대한 연구가 다양하게 진행되었다^[9-10]. Luo 등은 레이저 쏘피닝(Laser shock peening, LSP)를 통하여 표면경도와 잔류응력을 개선시켰다^[11]. Paryk 등은 이중 버니싱 공정(Duplex burnishing) 공정을 통해 새로운 피로성능개선 공정에 대해 제안하였다^[12]. Kattoura 등은 초음파나노표면개질기술(UNSM)을 이용하여 ATI 718 Plus 소재의 표면처리 후 소성변형으로 인한 미세조직 분석을 통해 전위(Dislocation) 및 잔류응력(Residual stress) 영향에 대한 효과를 확인하였다^[13]. Ye 등은 초음파나노표면개질기술(UNSM)을 이용하여 SUS304 소재에 대해 피로성능 개선과 표면 압축잔류응력이 1400MPa까지 적용됨을 확인하였다^[14]. Bleicher 등은 해머피닝(Hammer peening) 기술을 이용하여 경화불의 직접적인 타격을 이용하여 표면개질 효과와 경도상승 및 압축잔류응력이 부가됨을 연구하였다^[15].

이러한 기계적 표면개질기술은 Fig. 1과 같이 새로운 재료의 첨가나 제거없이 표면 결정조직을 미세화(Grain refinement) 하고 표면에 압축 잔류응력을 부가하여 내마모성, 내피로성 등을 향상시키는 방법으로 경제적이고 친환경적이다. 본 연구에

서는 자동차용 엔진블록 내부의 내마모성을 극대화시키는 방법으로 UNSM공정과 버니싱 공정을 연계한 하이브리드 기계적 표면가공처리 공정을 새롭게 제안하였다. 제안된 공정의 효과를 분석하기 위해 수치해석, 경도변화, 미세조직과 내마모성 시험을 통해 공정조건을 분석하였다.

2. 이론적 연구

2.1 표면경도와 내마모성의 관계

경도와 내마모성의 관계는 Archard 식을 이용하여 나타낼 수 있다^[16]. 미끄럼 마찰운동을 하는 공구 접촉면에서 연삭되는 마모량은 아래 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_w = \frac{k_w P S'}{H} \quad (1)$$

여기서, V_w 는 마모량(Wear volume), k_w 는 마모계수(Wear coefficient), P 는 하중, S' 는 미끄럼 거리(Sliding distance), H 는 재료 경도를 나타낸다. 즉 접촉면에서 하중 P 와 미끄럼 거리 S' 가 마모량에 비례하며 마모되는 재료의 경도 H 는 반비례함을 알 수 있다. 내마모성이 큰 소재일수록 동일조건에서 마모량이 적어짐을 알 수 있다.

기계적 표면처리기술로 버니싱과 UNSM 공정효과를 결정구조의 미세화, 압축 잔류응력 발생 등을 통해서 표면개질이 이뤄지며 식(2)와 같은 다양한 강화효과의 복합적인 작용이 나타난다^[17].

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_g + \sigma_f \quad (2)$$

여기서, σ_d 는 전위(Dislocation)에 의한 응력변화, σ_g 는 결정립(Grain boundary)에 의한 응력변화 σ_f 는 마찰(Friction stress)에 의한 응력변화를 나타낸다. 또한 가공경화(Work hardening) 효과는 Coulomb 식(3)에 의해 운동조건(Sliding condition)과 고착조건(Sticking condition)으로 나타낼 수 있다^[18].

$$F = \mu N \quad (3)$$

여기서, F 는 마찰력(Friction force), μ 는 마찰계수

(Friction coefficient), N 은 수직력 (Normal force)을 나타낸다. Fig. 2와 같이 마찰하는 두 물체 A, B에 서 마찰계수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A_r}{\sigma A_r} = \frac{\tau}{\sigma} \quad (4)$$

여기서, τ 는 전단응력(Shear stress), σ 는 수직응력 (Normal stress), A_r 은 실제 접촉면적(Contact area)을 나타낸다. 또한, 수직응력은 접촉하는 두 재료 간의 친화성, 표면조도 등에 따라 차이가 발생하고 식(5)와 같이 재료의 표면 경도 H 와 비례관계에 있다.

$$\sigma \propto H \rightarrow \mu \propto \frac{\tau}{H} \quad (5)$$

따라서 마찰계수는 전단응력에 비례하고 재료 경도 H 와 반비례함을 알 수 있다. 즉 재료 경도 H 가 높아지면 마찰계수 μ 가 감소하는 효과도 나타나서 마모량 감소에 기여한다.

두 물체의 상대운동에 의해 접촉부에 전단응력이 발생하게 되고 전위 이동에 의한 소성변형이 국부적으로 일어난다. 따라서 전단응력과 마찰인

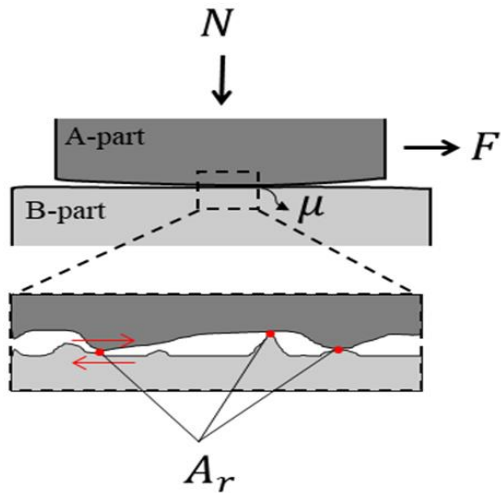


Fig. 2 Schematic diagram of contacted two parts : normal force(N), shear force(F), and friction coefficient(μ)

자와의 관계를 식(6)과 같이 나타낼 수 있다^[19].

$$m = \frac{\tau}{k}, \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (6)$$

여기서, m 은 마찰인자(Friction factor), k 는 전단항복응력(Shear yield stress)이다. 마찰인자 m 이 1일 때 고착상태 조건이 되고 식(7)과 같이 Tresca 항복조건과 von-Mises 항복조건을 적용할 수 있다^[20].

$$m = \frac{\tau}{k} = \frac{\tau}{Y/2} = \frac{\tau}{Y/\sqrt{3}} \quad (7)$$

여기서, Y 는 단축인장 시험에서 구한 항복응력 (Yield stress)이며 $Y/2$ 와 $Y/\sqrt{3}$ 은 각각 Tresca, von-Mises에서 정의된 전단항복응력 k 값을 의미한다. 가공경화에 의해 항복응력이 증가하면 마찰인자 m 이 감소하게 된다. 따라서 가공경화로 항복응력값이 올라가면 내마모성도 개선될 수 있게 되어 기계적 표면처리에 의한 가공경화와 경도값 증가는 내마모성 향상에 기여할 수 있다.

2.2 기계적 표면처리 공정이론

초음파 나노표면 개질공정(UNSM)은 식(8)에 나타낸 것처럼 정적 하중(Static load)과 동적하중 (Dynamic load)을 동시에 사용하여 압입자(Tip)를 초당 20,000회 이상 타격하여 재료 표면에 소성변형을 발생시키고 이를 통해 표면부에 결정조직을 미세화하고 압축 잔류응력을 발생하는 기능을 한다^[21,22].

$$F_t = P_s + P_d = P_s + P_a \sin 2\pi f t \quad (8)$$

여기서, F_t 는 총 하중 (Total load), P_s 는 정적 하중 (Static load), P_d 는 동적 하중 (Dynamic load), P_a 는 진폭에 의한 하중 (Amplitude of dynamic load), f 는 초음파 진동수 (Frequency of ultrasonic), t 는 공정 시간(Work time)이다.

Fig. 3(a)는 UNSM 공정의 주요 파라미터를 나타낸 것이다. UNSM 표면처리 효과로 표면의 조도에도 영향을 주게 되는데 일반적으로는 모재에 비하여 표면이 조밀하고 조도가 좋아지는 방향으로

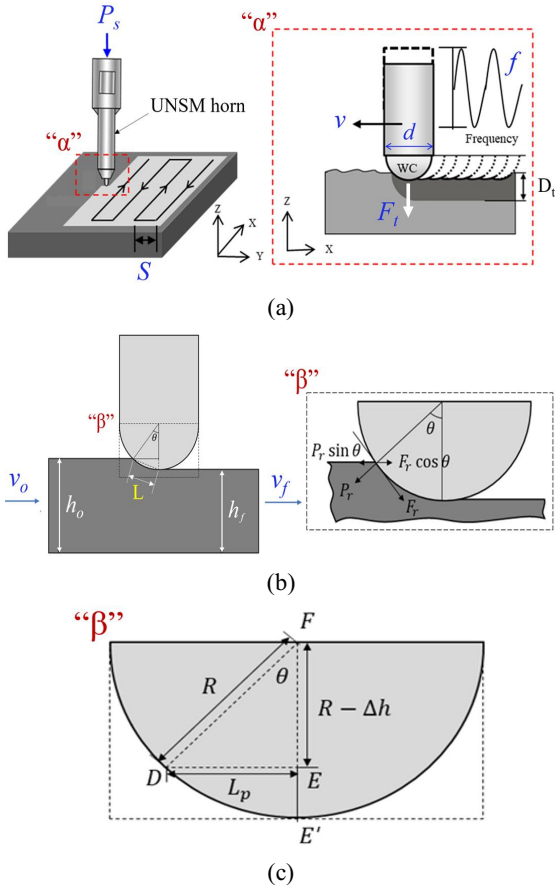


Fig. 3 (a) Schematic diagram of UNSM process parameters, (b) burnishing parameters, and (c) geometric analysis on a burnishing tip

효과가 나타난다^[23]. UNSM 공정에서 압입자가 재료 표면에 만드는 미세한 덩플 (Dimple) 모양의 수는 공정조건에 따라 달라지며 식(9)와 같이 표현된다.

$$N_c = \frac{f}{Sv} \quad (9)$$

여기서, N_c 는 단위 면적당 충돌 수 (Number of collisions per contact area), S 는 공구 경로 간격 (Interval), v 는 이송속도 (Processing velocity)이다. 따라서 UNSM 공정에서 총 변형률에너지 밀도 (Strain energy density)는 식(10)과 같다.

$$E_d = F_t N_c \frac{A}{d} \quad (10)$$

여기서, E_d 는 변형 에너지 밀도(Deformation energy density), A 는 초음파 진폭(Amplitude), d 는 압입자 끝단 볼지름 (Ball diameter)을 의미한다.

버니싱 공정은 스틱 형태 또는 롤러 형태의 공구를 이용하여 재료 표면을 압입하여 소성변형을 유도하여 가공경화시키는 공정기술이다^[38,39]. Fig. 3(b)는 버니싱 공정에 대한 공정변수를 나타낸 것이다. R 은 스틱 끝단 반구의 반지름(Stick radius), v_o 는 판재 유입속도 (Plate entry speed), v_f 는 판재 출구속도(Plate exit speed), h_o 는 초기 판두께 (Initial plate thickness), h_f 는 출구쪽 판두께(Final plate thickness), L 은 공구와 접촉길이(Contact length), Δh 는 $h_o - h_f$, L_p 는 투영길이(Contact length of projection), F_r 은 접선 마찰력(Tangential friction force), P_r 은 반경방향 하중(Radial force), θ 는 접촉각(Angle of contact)이다.

버니싱 공구의 물림이 시작될 때의 힘의 평형은 식(11) 및 식(12)와 같다.

$$F \cos \theta = P_r \sin \theta \quad (11)$$

$$\frac{F}{P_r} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta \quad (12)$$

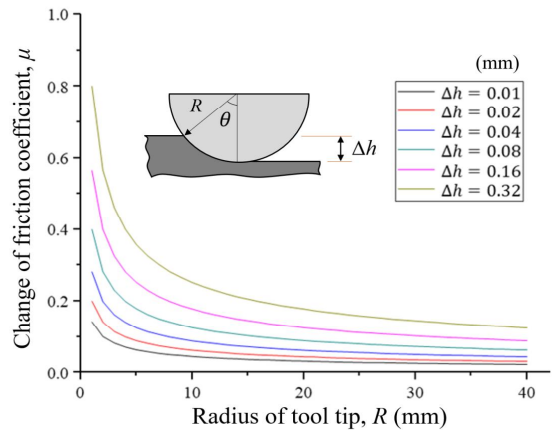


Fig. 4 Change of friction coefficient by radius of tool tip and depth of burnishing

쿨롱의 마찰법칙($F = \mu P_r$)을 식(12)에 적용하여 정리하면 마찰계수 (μ)는 식(13)와 같이 공구와 판재의 접촉각과 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

$$\mu = \tan \theta \quad (13)$$

Fig. 3(c)에서 접촉각 (θ)이 매우 작다면 $\overline{DE'} = \widehat{DE'}$ 가 되고 $\overline{DE} = \overline{DE'} = L_p$ 로 둘 수 있다. 삼각형 DEF에서 Δh 가 R 에 비해 매우 작다고 가정하면 식(14)와 같이 표현된다.

$$\tan \theta = \frac{L_p}{R - \Delta h} = \sqrt{\frac{2\Delta h}{R}} = \mu \quad (14)$$

따라서 버니싱 공정에서 마찰계수는 반지름(R)에 반비례하고, 가공량(Δh)과 비례 관계임을 알 수 있다. 다시 말하면 버니싱 공구 반지름이 커질수록 마찰계수는 감소하여 버니싱 하중을 줄이게 되고 이에 따른 표면 경화특성도 달라지게 된다.

본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 해석 결과를 바탕으로 여러 조건 중에서 공정하중을 줄이고 표면처리 효과를 올리기 위해 버니싱 가공량을 0.01mm로 공정조건을 선정하였다.

3. 하이브리드 표면처리 실험

3.1 실험장치 구성

버니싱 공정의 공구는 초경 재료를 이용하여 스틱 (Stick) 공구는 Fig. 5와 같이 제작하여 사용하였다. 공구제작은 부산대 하이브리드 제조혁신

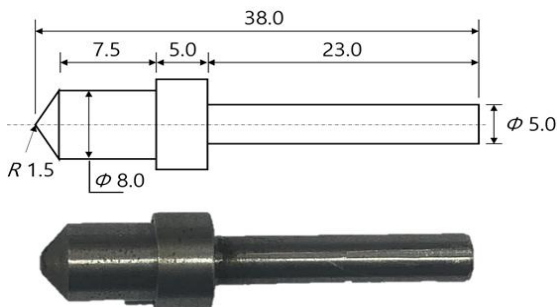


Fig. 5 Designed and manufactured shape of the burnishing tool

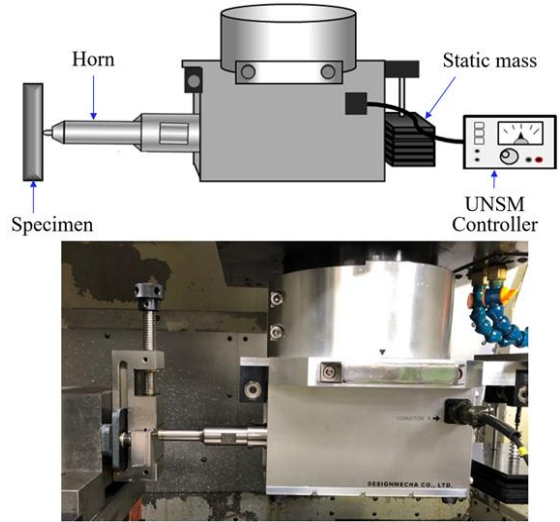


Fig. 6 UNSM equipment for surface treatment

엔지니어링센터의 DNT2600 (DN Solutions, Korea) 터닝머신에 DNMG 150408 FC-TT812B (TaeguTech Co., Korea) 공구를 사용하였다. 제작된 공구는 CNC머신(43V, Hwacheon, Korea)에 장착하여 버니싱 가공량에 맞추어서 실시하였다. 또한, UNSM 공정의 경우 한국의 디자인메카에서 제작한 장비를 부산대 하이브리드 제조혁신엔지니어링센터의 CNC 공작기계(43V, Hwacheon Co., Korea)에 부착하여 Fig. 6과 같이 사용하였다.

3.2 예비실험 결과

버니싱 공정과 UNSM 공정의 변수에 대해서 Table 1에 정리하였다. 버니싱 공정변수의 경우 가공깊이(D_t), 공구의 이송속도(v), 가공간격(S)으로 두었고 각각 3수준으로 실험하였다. 또한, UNSM의 경우, 가공깊이 대신 초기 하중 (static load)을 공정변수로 두었다.

L9 직교배열표를 사용하여 9가지 실험조건에 대해서 각각 실시하고 경도변화에 따른 공정변수 요인효과를 분석하였다. 경도는 가공면에 100 μ m 간격으로 마이크로 경도계(HM-200, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 5점을 측정하고 평균값으로 구하였다. 사용 소재는 회주철(cast iron)계열로 Table 2에 조성비를 나타내었다.

Table 1 Process parameters of burnishing and UNSM

Stick burnishing			
	Depth (D_f)	Speed (v)	Space (S)
1 level	0.1 mm	250 mm/min	0.025 mm
2 level	0.15 mm	500 mm/min	0.05 mm
3 level	0.2 mm	1000 mm/min	0.1 mm

UNSM			
	Static load	Speed (v)	Space (S)
1 level	1 kgf	250 mm/min	0.025 mm
2 level	2 kgf	500 mm/min	0.05 mm
3 level	3 kgf	1000 mm/min	0.1 mm

Table 2 Major chemical components of a material

Chemical major components			
C	Si	Mn	Cu
3.2	1.9	0.7	2.0
Cr	Ni	Mo	Fe
0.1	0.1	1.5	Bal.

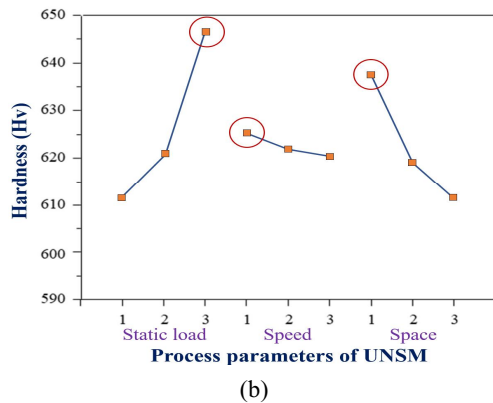
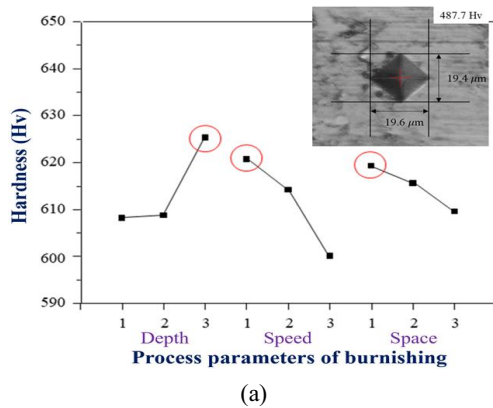


Fig. 7 Parametric test results of hardness; (a) burnishing and (b) UNSM

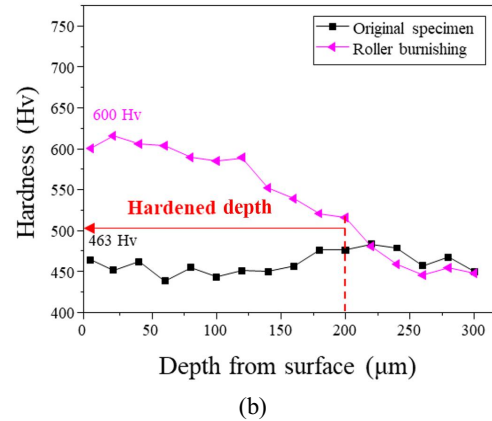
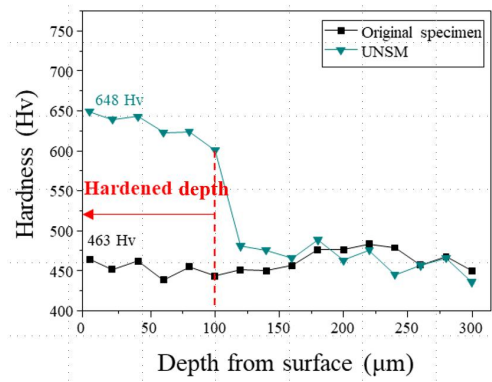


Fig. 8 Hardness variation from the treated surface; (a) burnishing and (b) UNSM under optimal parametric conditions

Fig. 7(a)와 7(b)에 나타낸 바와 같이 시편을 두께방향으로 와이어 커팅한 뒤에 표면부부터 금속 마이크로 경도계로 경도를 측정하면 버니싱 깊이가 깊거나 UNSM 하중이 클수록 경도가 올라가는 것을 알 수 있다. 표면부 경도 측정은 두께방향으로 절단된 시편에서 측정이 어렵기에 기존 시편에서 표면부를 측정하였다. 또한, 표면처리하는 간격이 좁을수록 가공경화에 의한 경도 증대 효과가 커졌다. 따라서 이러한 공정변수 영향을 통해서 원하는 표면경도를 얻기 위한 최적화가 가능하다.

Fig. 8(a)와 8(b)에 정리한 것처럼 UNSM 표면처리가 버니싱에 비하여 표면경도 향상에 더 크게 영향을 주고 경화 깊이는 버니싱 표면처리가 더

크를 알 수 있다. 이러한 차이는 두 가지 표면처리가 가지는 가공경화 메커니즘이 다르기 때문에 나타나는 현상이다. 버니싱의 경우 소성변형에 의한 가공경화 효과에 의해 경도가 증가된다면 UNSM의 경우 결정구조가 정적하중을 초음파와 가진으로 표면부를 타격하면 결정조직 미세화(grain refinement)가 되고 이를 통해 압축 잔류응력의 증가로 인해 경도값이 올라간다.

3.3 하이브리드 표면처리 실험결과

본 연구에서는 버니싱과 UNSM 공정을 연속적으로 적용하여 표면경도를 극대화하는 공정을 제안하였다. 3.2절에 기술된 각 표면처리 공정별 최적 조건에 따라 5가지 경우에 대한 표면부에서 깊이 방향으로 경도변화를 측정하여 Fig. 9에 비교하였다.

표면처리를 하지 않은 원 소재의 경우 깊이에서 따른 경도변화가 없으며, 약 462Hv로 나타났다. 그러나 버니싱 표면처리를 할 경우 표면에서 약 200 μm 부근까지 경도가 모재에 비하여 증가하였으며, 표면부는 최대 600Hv 수준으로 나타났다. 또한 UNSM 처리만 실시한 경우에는 약 100~120 μm 깊이까지 표면처리에 의한 경도가 상승하였으며 표면부 최대 경도는 약 648 Hv로 버니싱 보다 증가하였다.

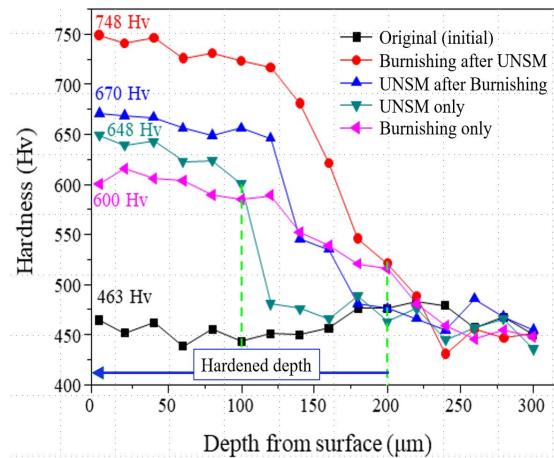


Fig. 9 Comparison of five hardness distributions from each treated surface

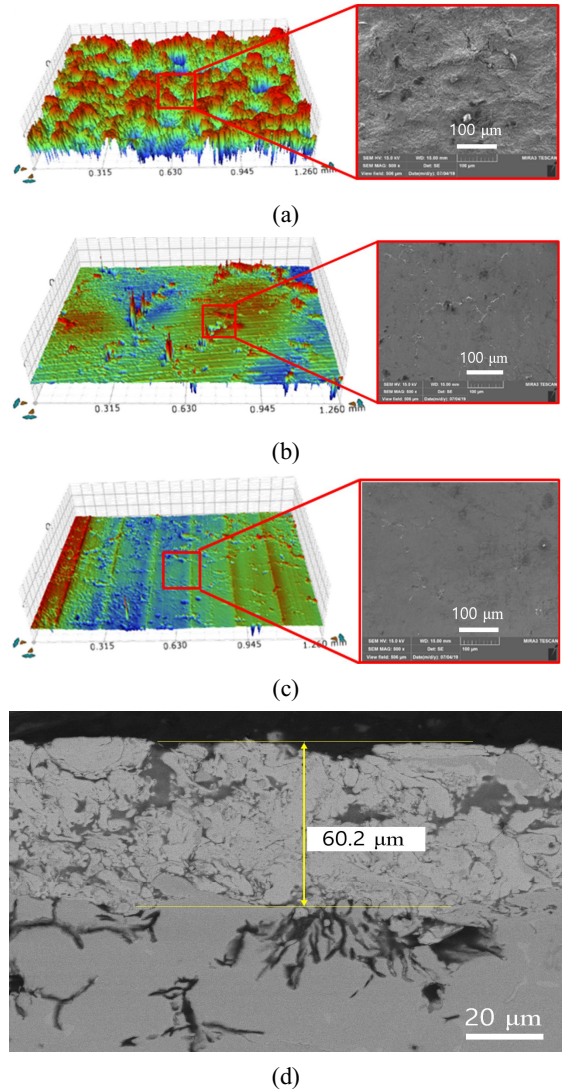


Fig. 10 Measurement results of surface roughness and morphology: (a) initial specimen, (b) after UNSM treatment, and (c) after burnishing-UNSM sequentially treated surface. (d) SEM image of deformed microstructure after hybrid treatment (burnishing-UNSM) along the thickness direction from the top skin

그리고 하이브리드 방식으로 버니싱과 UNSM을 연속적으로 적용한 경우는 순서에 따라 표면부 경도값이 차이가 났으며 (전)버니싱-(후)UNSM 처리의

경우 748Hv, (전)UNSM-(후)버니싱 처리의 경우 670Hv로 나타났고 두 경우 모두 경도상승 깊이는 유사하게 나타났다. 따라서 최적의 하이브리드 표면처리 조합은 버니싱을 먼저 실시하고 UNSM을 이어서 처리하는 방식이 가장 좋은 것으로 나타났다.

이것은 버니싱의 경우 소성변형을 통하여 가공 경화에 의한 경도증가가 나타나고 UNSM의 경우 결정조직의 미세화를 통해서 경도가 증가하기 때문에 UNSM을 먼저 처리한 경우에 결정조직 미세화로 인해서 버니싱을 통한 소성변형이 어렵게 되어 효과적이지 못한 것으로 분석된다. 하이브리드 공정을 적용한 경우 모재대비 표면부의 경도가 61.5% 상승하였다. 그러나 경화되는 깊이는 버니싱 공정과 거의 유사하게 나타났다.

Fig. 10(a)-10(d)에 나타낸 것처럼 표면거칠기 장비 (NV-3000, Nano system, South Korea)로 측정하면 초기 시편의 표면조도는 약 $Ra = 0.11\mu m$ 수준이며 UNSM 처리후에는 Ra 값이 평균 $0.07\mu m$ 로 나타났고, 본 연구에서 최적화된 하이브리드 공정 (UNSM after burnishing)으로 처리한 경우 Ra 값이 평균 $0.02\mu m$ 로 초기시편 대비 약 81.8% 표면조도가 개선되었다. 또한 Fig. 10(d)에 나타낸 것처럼 하이브리드 공정 처리후에 두께방향의 결정구조의 변형을 약 $60\mu m$ 두께까지는 결정구조의 변형이 크게 발생하였고 이로 인한 경도 증가가 급증한 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서 초내마모성 구현을 위한 새로운 하이브리드 방식의 기계적 표면처리를 통해서 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 버니싱 표면처리 공정은 버니싱 공정 깊이에 따라 경도변화가 크게 달라졌고, 공정깊이가 0.2 mm인 경우 경도값이 가장 높았다. 또한 사용된 주철계열의 모재에서 버니싱 깊이가 0.2 mm 이상인 경우 표면균열이 발생하여 적용할 수가 없었다.
2. UNSM 표면처리의 경우 결정립 미세화와 잔류응력의 증가로 경도가 증가하며 버니싱에 비하여 표면경도는 약 8% 더 증가하는 것으로 나타났

다. 그러나 표면처리의 깊이방향의 효과에서는 버니싱 공정보다 약 50% 줄어든 것을 알 수 있었다.

3. 하이브리드 표면처리 방식에서 버니싱 처리후 UNSM 표면처리를 실시한 경우 가장 효과적이었으며, 모재에 비하여 약 61.5% 수준으로 경도가 올라갔다. 또한 표면처리 깊이도 버니싱 공정과 동등한 수준으로 $200\mu m$ 깊이까지 경도가 증가됨을 알 수 있었다.
4. 표면조도 변화를 관찰결과 초기시편 대비 하이브리드 공정처리후 약 81.8%가 개선되었고, 또한 결정구조의 변형이 SEM 이미지로 보면 $60\mu m$ 깊이까지 급격한 결정변형 발생을 관찰할 수 있었다.

후 기

“이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업 (2023.03.~2025.02, 2년과제) 지원으로 수행되었으며 관계자에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Schulze, V., “Modern mechanical surface treatment: states, stability”, effects. John Wiley & Sons, 2005.
2. Yu, J. H., Lee, K. Y., and Park, S. H., "Metal embedding and ultrasonic nanocrystal surface modification technology for super wear-resistant mechanical parts", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 101, No. 1-4, pp. 951-962, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2920-y>
3. Wang, L., Chen, Y., Wang, C., and Wang, Q., "Fatigue life analysis of aluminum wheels by simulation of rotary fatigue test", Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, Vol. 57, No. 1, pp. 31-39, 2011.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2009.046>
4. Kazuyuki, O., "Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP)", Journal of Materials Processing

- Technology, Vol. 211, No. 8, pp. 1395-1399, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.011>
5. Zhang, X., Chen, Y., and Hu, J., "Recent advances in the development of aerospace materials", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 97, pp. 22-34, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001>
6. Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Heim, H. P., and Feldmann, M., "Effects of surface modification on dispersion, mechanical, thermal and dynamic mechanical properties of injection molded PLA-hydroxyapatite composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 103, pp. 96-105, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.09.013>
7. Zhi, J. H., Zhang, L. Z., Yan, Y., and Zhu, J., "Mechanical durability of superhydrophobic surfaces: The role of surface modification technologies", *Applied Surface Science*, Vol. 392, pp. 286-296, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.049>
8. Schulze, V., Bleicher, F., Groche, P., and Guo, Y. B., Pyun, Y. S., "Surface modification by machine hammer peening and burnishing", *Cirp Annals*, Vol. 65, No. 2, pp. 809-832, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.005>
9. Bagherifard, S., Slawik, S., Ferngdez-Pariente, I., Pauly, C., Mucklich, F., and Guagliano, M., "Nanoscale surface modification of AISI 316L stainless steel by severe shot peening", *Materials & Design*, Vol. 102, pp. 68-77, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.162>
10. Balla, V. K., Dey, S., Muthuchamy, A. A., Ram, G. D. J., Das, M., and Bandyopadhyay, A., "Laser surface modification of 316L stainless steel", *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, Vol. 106, No. 2, pp. 569-577, 2018.
<https://doi.org/10.1002/jbm.b.33872>
11. Luo, K. Y., Jing, X., Sheng, J., Yan, Z., and Lu, J. Z., "Characterization and analyses on micro-hardness, residual stress and microstructure in laser cladding coating of 316L stainless steel subjected to massive LSP treatment", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 673, pp. 158-169, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.266>
12. Zhang, X., Q., Li, H., Yu, X. L., Zhou, Y., Daum, W. W., Li, S. Z., Huang, Z. L., and Zhou, L. S., "Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate", *Materials & Design*, Vol. 65, pp. 425-431, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.001>
13. Kattoura, M., Telang, A., Mannava, S. R., Qian, D., and Vasudevan, V. K., "Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 711, pp. 364-377, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.043>
14. Ye, C., Telang, A., Gill, A. S., Suslov, S., Idell, Y., Zweigacker, K., Wieszorek, J. M. K., Zhou, Z., Qian, D., Mannava, S. R., Vasudevan, V. K., "Gradient nanostructure and residual stresses induced by Ultrasonic Nano-crystal Surface Modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 613, pp. 274-288, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.114>
15. Bleicher, F., Lechner, C., Habersohn, C., Kozeschnik, E., Adjassoh, V., and Kzminski, H., "Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology", *CIRP Annals*, Vol. 61, No. 1, pp. 375-378, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.139>
16. Jo, Y. K., Yu, J. H., Jeong, H., S., Beak, G. Y., Lee, K. Y., and Park, S., H., "Experimental analysis on multilayer cladding using AISI-M4/H13 Metal Powders for enhancement of wear resistance and shockproof characteristics", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 36, No. 11, pp. 1059-1064, 2019.

<https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.11.1059>

17. Kumar, D., Idapalapati, S., Wang, W., and Narasimalu, S., "Effect of Surface Mechanical Treatments on the Microstructure-Property-Performance of Engineering Alloys", *Materials*, Vol. 12, No. 16, Article No., 2503, 2019.
<https://doi.org/10.3390/ma12162503>
18. Choudhary, B. K., Samuel, E. I., Rao, K. B. S., and Mannan, S. L., "Tensile stress-strain and work hardening behavior of 316LN austenitic stainless steel", *Materials science and technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 223-231, 2001.
<https://doi.org/10.1179/026708301101509890>
19. Zhang, D. W., and Ou, H., "Relationship between friction parameters in a Coulomb-Tresca friction model for bulk metal forming", *Tribology International*, Vol. 95, pp. 13-18, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.030>
20. Khanna, K., Gupta, V. K., and Nigam, S. P., "Creep analysis in functionally graded rotating disc using tresca criterion and comparison with von-mises criterion", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 2431-2438, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.094>
21. Cherif, A., Pyoun, Y., and Scholtes, B., "Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on residual stress state and fatigue strength of AISI 304", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 2, pp. 282-286, 2010.
<https://doi.org/10.1007/s11665-009-9445-3>
22. Amanov, A., Sasaki, S., and Pyun, Y. S., "Frictional behavior of duplex nano-corrugated and nanostructured Cu alloy produced by UNSM", *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 491-496, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.211>
23. Amanov, A., Cho, I. S., Pyun, Y. S., Lee, C. S., and Pakr, I. G., "Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects", *Wear*, Vol. 286, pp. 136-144, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.001>