

# 레이저 충격파를 이용한 저탄소강의 산세효율 증진 기술

## Method for enhancing the efficiency of scale removal on low-carbon steel surfaces using laser-induced shock wave

포항공과대학교 기계공학과 임현규, 김동식

### I. 서론

본 연구 목적은 산업용 레이저를 이용하여 저탄소강 표면의 스케일(scale)을 제거하는 냉연공정 전처리 기술의 개발로서 레이저 세척기술의 응용 가능성을 확인하는 것이다. 현재까지 레이저 세척 기술을 철강산업 분야에 적용한 연구/개발 사례가 없으나 레이저 세척 기술은 저가 산업용 레이저 장비 보급과 더불어 최근 급속도로 발전하여 대단위 산업분야에 확대 이용되고 있고 친 환경적이라는 이유로 화학세척 공정을 대체해 나아가고 있다.<sup>1-8)</sup> 따라서 본 기술 개발은 폐수로 인한 환경 문제 해결, 에너지 절감, 용수문제 해결 및 제품 품질 향상이라는 관점에서 매우 중요하다. 열연강판으로 800도 이상의 고온에서 마무리 압연되어 그 표면에 다량의 스케일로 덮여 있다. 열연강판 스케일은 표층으로부터 Hematite( $Fe_2O_3$ ), Magnetite( $Fe_3O_4$ ), Wustite( $FeO$ )가 층상을 이루고 있고 냉간압연시 제품 표면 손상은 물론 도금성, 도장성을 저해하는 요인으로 압연 전에 제거되어야 한다.<sup>9)</sup>

펄스 레이저를 이용한 클리닝(cleaning) 기술은 공기 중 직접 ablation 방법과 충격파 이용 방법, 액막 분사 ablation 방법 등이 있고 금속 표면 위의 산화막 제거와 관련하여 전기화학적으로 전기장이 걸린 전해질에 펄스 레이저를 조사하여 0.1 $\mu m$  두께의 스케일을 제거할 수 있는 것으로 근래 보고되었다.<sup>7)</sup> 제철소에서 생산되는 열연강판의 스케일은 대략 8 ~ 10  $\mu m$ 의 두께를 갖고 강하게 모재에 부착되어 있을 뿐만 아니라 공기 중에서는 레이저 가열에 의한 산화가 진행되므로 직접 ablation 방식으로는 스케일을 완전히 제거하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 낮은 농도의 염산 수용액에 레이저를 집속 시켜 충격파를 유도하고 충격파의 기계적인 효과에 의해 산세 효율을 증진시키는 새로운 기법을 제안하고 타당성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

### II. 실험

실험에서는 레이저 파장 1064 nm에서 반치전폭(FWHM) 5 ns인 펄스를 발진하는 Q-switched Nd:YAG 레이저(제조사: Continuum, 모델: Surelite II-10)를 이용하였다. 레이저 빔을 액체 내에 집속 시켜 유도된 플라즈마/충격파를 이용한 스케일 제거의 기본적인 메커니즘을 도시한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 실험에서는 일정 농도의 염산 수용액을 고온으로 가열한 후 레이저 펄스를 염산 수용액 표면에 집속 시켜 브레이크다운을 일으킨다. LIB(laser-induced breakdown)에 의해 생성된 플라즈마는 10,000K 이상의 온도까지 가열될 수 있으며, 가시적광을 발산하면서 이온과 플라즈마 압력을 10,000 ~ 100,000bar까지 높인다.<sup>10)</sup> 따라서 충격파와 유체 중에 생성된 cavitation 압력이 스케일 브레이커(scale breaker)의 역할을 하여 산세효율을 증진시키게 된다.

정량적인 스케일 제거 효율을 측정하기 위해 브레이크다운 강도와 레이저 조사 횟수를 변화시켜가면서 충격파를 가한다. 한편, 레이저 플라즈마/충격파의 압력은 브레이크다운 발생시 유도되는 가청 음압(sound pressure)에 비례한다는 가정 하에 브레이크다운이 발생하는 지점에서 30cm 떨어진 microphone (50Hz ~ 20,000Hz)을 설치하여 발생 음압을 측정하였다. 공정 후에는 광학현미경, 전자현미경, EDS 분석을 통해, 스케일 제거 정도를 정량화 하였다. 스케일 제거 효율은 레이저에 의해 발생된 압력파와 염산 수용액의 농도, 반응 시간, 레이저 조사 횟수 등의 함수라고 볼 수 있으며, 위 인자들을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

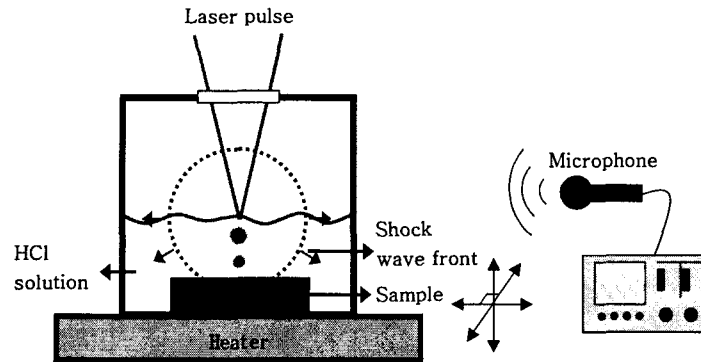


Fig. 1 Experimental setup for the removal of scale on low carbon steel using shock waves induced by optical breakdown in an aqueous HCl solution.

### III. 결과 및 고찰

먼저, 레이저에 의해 유기된 충격파의 영향을 알기 위해 기존 산세 공정과 동일하게 80 C, 18% 염산 수용액에 담그는 방식과 충격파 효과를 추가한 방식을 비교하였다. Fig. 2(a)는 80 C, 18% 염산 수용액 내에서 시편을 15초 동안 화학적으로 식각 시켰을 때의 표면의 스케일 상태를 보여준다. Fig. 2(b)는 18%, 80 C 염산 수용액 표면에서 1mm 깊이에서 시편을 놓고 15초 동안 브레이크다운 음압 1.20Pa으로 레이저 충격파를 1cm<sup>2</sup> 면적에 20회 고르게 가했을 때의 표면을 보여준다. 실험에서는 염산수용액에 스케일을 10초 동안 반응시킨 후 5초 동안 20회의 충격파를 가했다. Fig. 2(a)와 2(b)를 비교해서 보면, 충격파의 영향으로 검은 스케일이 많이 제거 되었음을 볼 수 있다. Fig. 3은 18%, 80 C 염산 수용액으로만 스케일을 제거한 결과와 18%, 80 C 염산 수용액 내에서 레이저에 의해 유도된 충격파를 이용한 공정을 비교한 그래프로써, 레이저를 이용한 복합공정에서 산소 원소의 함량이 더욱 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 새로운 공정이 기존 산세 공정에 비해 훨씬 높은 스케일 제거 효율을 보임을 확인할 수 있다.

환경 친화적인 스케일 제거 공정이 되기 위해서는 염산 사용을 최대한 억제해야 하므로, 기존의 산세 공정 효율에 근접하는 최저의 염산 농도를 알아 볼 필요가 있다. 따라서, 염산 수용액 농도 변화에 따른 레이저 브레이크다운 효과의 영향을 비교해 보았다. Figs. 4(a)~4(c)는 80 C 염산 수용액의 농도를 5%, 10%, 18%로 각각 변화시키고 2.07Pa 음압에 해당하는 충격파를 가했을 때 스케일 층의 변화를 보여준다. 음압이 1.20Pa에서 2.07Pa까지 증가되도록 레이저 에너지를 높인 것은 낮은 농도의 염산 수용액에서는 스케일이 천천히 제거되어 더 높은 충격파가 요구되기 때문이다. Fig. 5는 기존 산세

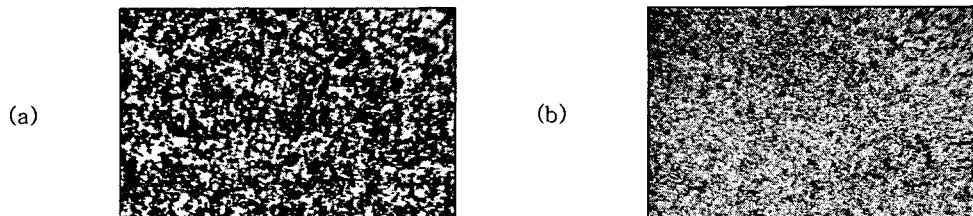


Fig. 2 Micrographs of steel surfaces in 18% HCl solution for 15sec (a) without a laser pulse and (b) with 20 laser pulses (sound pressure: 1.20Pa)

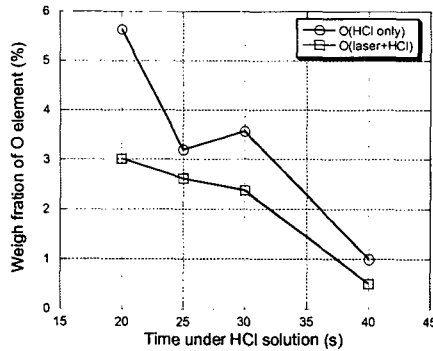


Fig. 3 Variation of O content with and without laser breakdown in HCl(80 C, 18%) solutions.

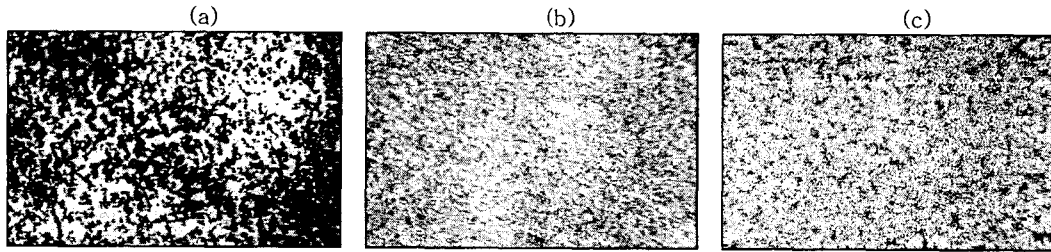


Fig. 4 Micrograph of steel surface after 20 s in (a) 5%, (b) 10 %, and (c) 18 % HCl solutions with 20 laser pulses (sound pressure: 2.07Pa).

공정과 이번 연구에서 고안한 병합 스케일 제거 공정(HCl 10%)과의 스케일 제거 효율을 비교하여 보여주는 그래프이다. 그림에서 염산수용액 18% 만으로 스케일을 제거하는 기존 공정보다 레이저에 의해 유도된 충격파를 이용한 병합 산세공정에서 O 원소량이 더 낮은 값을 보임을 알 수 있다. EDS 분석 결과에 따르면 C 함량 또한 레이저를 이용한 공정의 경우가 더 낮은 값을 보인다. 따라서 레이저 충격파를 이용한 병합 산세공정은 기존 공정보다 스케일 제거 효율이 높다. 결과적으로 레이저 충격파 병합 공정은 공정시간 및 화학물질 사용량 감축, 스케일 제거 효율 증가 등의 장점이 있는 것으로 판단할 수 있다.

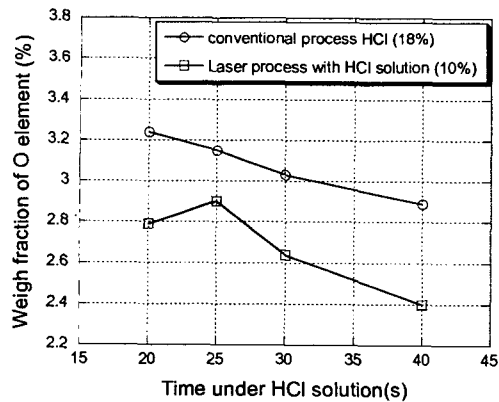


Fig. 5 Comparison of the conventional scaling-removal process with the novel process utilizing laser-induced shock wave at a low acid concentration.

#### IV. 결 론

연구를 통해 기존 산세 공정과 레이저 충격파를 결합한 복합 공정은 스케일 제거 효율이 뛰어나고 환경친화적 공정임을 보였다. 특히, 10% 저농도 염산 수용액과 펄스레이저를 결합한 병합 산세방식은 18%의 염산수용액으로 스케일을 제거하는 기존 공정보다 C 및 O 원소량 모두 낮은 값을 보여 기존 공정의 스케일 제거 효율을 증가함을 입증하였다. 본 연구 결과를 산업적으로 이용하기 위해서는 경제성 검토와 더불어 공정을 최적화 하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

#### V. 참고문헌

1. R. M. Miller : Portable Laser Systems for Cleaning and Coatings Removal, Precision Cleaning, pp. 16-25, (1999)
2. K. L., Mittal, ed. : Particles on surfaces 1: detection adhesion, and removal, Plenum Press, New York, (1988)
3. A. C. Tam, W. P. Leung, W. Zapka, and W. Ziemlich : Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates, Journal of Applied Physics, 71, pp. 3515-3523, (1992)
4. M. She, D. Kim, and C. P. Grigoropoulos : Liquid-assisted pulsed laser cleaning using near-infrared and ultraviolet radiation, Journal of Applied Physics, 86, No. 11, pp. 6519-6524, (1999)
5. P. E. Lafargue, N. Chaoui, E. Millon, J. F. Muller, H. Derule, A. Popadenec : The laser ablation/desorption process used as a new method for cleaning treatment of low carbon steel sheets, Journal of Surface and Coatings Technology, 106, pp.268-276, (1998)
6. A. Kearns, C. Fischer, K.G. Watkins, M. Glasmacher, H. Kheyrandish, A. Brown, W.M. Steen, P. Beahan : Laser removal of oxides from a copper substrate using Q-switched Nd:YAG radiation at 1064nm, 532nm, 266nm, Journal of Applied Surface Science, 127-129, pp.773-780, (1998)
7. R. Oltra, O. Yavas, O. Kerrec : Pulsed laser cleaning of oxidized metallic surfaces in electrochemically controlled liquid confinement, Journal of Surface and Coatings Technology, 88, pp 157-161, (1996)
8. J. M. Lee, K. G. Watkins : Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves, Journal of Applied Physics, 89, pp.6496-6500, (2001)
9. R. Durham, J. Lacaze, D. Monceau, B. Pieraggi : Short-term high temperature oxidation of lamellar cast iron, Materials science of forum, 369-372, pp. 181-188, (2001)
10. A. Vogel and S. Busch : Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water, Journal of Acoustical Society of America, 100, pp. 148-165, (1996)