레이저 피닝 처리 및 적용 기술

김 중 도^{*,†} · 무네하루 쿠쓰나^{**} · 유지 사노^{***}^{*}한국해양대학교 기관공학부^{**}(株)最新レーザー技術研究センター^{***}(株)東芝 電力システム社 電力・社会システム技術開発センター

Laser Peening Process and Its Application Technique

Jong-Do Kim^{*,†}, Muneharu KUTSUNA^{**} and Yuji SANO^{***}^{*}Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 606-080, Korea^{**}Advanced Laser Technology Research Center Co.,Ltd., Anjo-shi, Aichi-ken, 446-0026, Japan^{***}Power and Industrial Systems Research and Development Center, Toshiba Corporation, Yokohama-shi, Kanagawa-ken, 235-8523, Japan[†]Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received August 12, 2015 ; Revised August 25, 2015 ; Accepted August 27, 2015)

Abstract

Advances in laser technology have yielded a multitude of innovative processes and applications in various industries. Laser peening is a typical example invented in the mid-1990s as a surface technology, which converted residual stress from tension to compression by just irradiating successive laser pulses to metallic materials under aqueous environment without any surface preparation. The effects of laser peening have been experimentally studied on residual stress, stress corrosion cracking(SCC) susceptibility and fatigue properties with water-penetrable frequency-doubled Nd:YAG laser. In addition, laser peening has been widely used in aviation and aerospace industries, automobile manufacturing and nuclear plant. One of the most important causes to improve the above-mentioned properties is the deeper compressive residual stress induced by laser peening. Taking advantage of the process without reacting force against laser irradiation, a remote operating system was developed to apply laser peening to nuclear power reactors as a preventive maintenance measure against SCC.

Key Words : Laser peening, Residual stress, Stress corrosion cracking, Fatigue, Nuclear power reactor

1. 서 론

피닝(peening)이란 재료의 표면층에 충격을 가함으로써 소성변형을 부여하여 잔류응력 및 피로강도를 개선하는 표면처리 방법으로, 쇼트 피닝, 해머 피닝, 초음파 피닝 및 레이저 피닝이 적용되고 있다. 특히 최근들어 레이저 발전기의 발달 및 소형화 그리고 레이저의 광파이버 전송기술로 인해 레이저 피닝 처리의 활용이 점차적으로 확대되고 있다¹⁻⁵⁾.

레이저 피닝은 높은 피크출력의 단펄스 레이저를 재료 표면에 조사하여 발생하는 플라즈마의 충격파에 의

해 높은 압축잔류응력이 형성되기 때문에 응력부식균열 방지, 피로강도 향상 등에 효과적이다. 레이저 피닝의 가장 큰 특징은 그 효과가 재료의 깊숙한 곳까지 미치는 것으로, 표면으로부터 약 1 mm 혹은 그 이상의 깊이까지 압축잔류응력을 형성할 수 있다. 또한 레이저 펄스마다 조사 조건을 정밀하게 제어하여 보다 고품질의 피닝 처리가 가능하다⁶⁻⁹⁾.

레이저 피닝에 관한 연구는 전세계적으로 지금까지 많이 이루어져 왔으며, 현재에도 활발히 진행되고 있다. Clauer 등¹⁰⁾은 레이저 피닝 현상의 메커니즘을 규명하기 위한 연구를 진행하였으며, Devaux 등¹¹⁾은 레이저 빔 프로파일 및 궁극적인 압력 프로파일을 제시하기 위

한 기초 연구를 수행하였다. 또한 레이저 피닝 프로세스의 매개변수에 대하여 Warren 등¹²⁾은 스폿 사이즈, Rubio-Gonzalez 및 Dorman 등^{13,14)}은 파워 밀도, Montross 및 Zhang 등^{15,16)}은 피닝시 충격 횟수의 영향을 연구하였다. 최근에는 다양한 산업으로의 적용을 위하여 여러 가지 재료에 대한 레이저 피닝 처리가 실시되어 철강재뿐만 아니라 스테인리스강¹⁷⁾, 알루미늄 합금¹⁸⁾, 티타늄 합금¹⁹⁾ 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 아직까지 국내에서의 적용이 미흡한 레이저 피닝 처리에 대하여 그 원리 및 특징 그리고 적용 효과를 설명하고 활용 사례에 대해 서술한다.

2. 레이저 피닝 프로세스

2.1 레이저 피닝의 원리

레이저 피닝의 기본적인 원리를 Fig. 1에 나타낸다. 높은 피크 출력의 단펄스 레이저를 재료에 조사하면 재료의 표층이 플라즈마화 되고, 표면에 고압의 플라즈마가 발생한다. 이때 그림과 같이 레이저 간섭층(물 등)이 존재하면 간섭층은 플라즈마의 팽창을 방해하기 때문에 좁은 영역에 레이저 에너지가 집중된다. 그에 따라서 발생하는 GPa급의 강도에 달하는 플라즈마의 압력에 의해 충격파가 발생하고 재료 내부로 전파된다. 이 충격파에 의해서 금속표면에 국부적인 소성변형이 발생하고 주위의 미변형부에 의해 구속을 받음으로써 재료의 표면에 압축잔류응력이 형성된다. 소성변형에 의한 압축잔류응력은 피로강도를 높여 응력부식균열의 방지, 피로균열의 진전 방지 등에 상당히 유효하다^{6,8,9)}.

Fig. 2는 수중 및 대기중에서 STS304 오스테나이트계 스테인리스강 표면에 펄스형태의 Nd:YAG 레이저의 제2고조파(파장 532 nm, 펄스에너지 100 mJ, 펄스폭 5 ns)를 조사하였을 때 플라즈마의 형상을 계측한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 수중에서 플라즈마의 팽창이 억제되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 플라

Fig. 1 Principle of laser peening process

Fig. 2 Plasma expansion during laser irradiation

즈마의 팽창을 억제하고 레이저 피닝 효과를 높이기 위해서는 두께 0.1 mm 정도의 물과 같은 간섭층이 필요하며, 대형 부품 및 구조물과 같이 부피가 큰 제품을 처리하는 경우는 표면에 물을 분사하면서 레이저를 조사하게 된다^{20,21)}.

2.2 레이저 피닝의 특징

Fig. 3에 쇼트피닝과 레이저 피닝의 잔류응력 분포를 비교하였다. 항공기용 Inconel718 합금 재료에 대한 피로시험시 레이저 피닝이 쇼트피닝에 비해 매우 높은 피로강도를 나타내어 약 10배 정도의 수명을 확인할 수 있었다²²⁾. 이와 같이 레이저 피닝은 기타 피닝방법과 비교하여 압축잔류응력 분포가 크고 깊기 때문에 응력부식균열의 방지에 용이하고, 국부적인 마이크로 피닝으로 인해 좁고 복잡한 구조물의 적용도 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한 사용 환경이 깨끗하고 소음이 적으며, 소형화도 용이하다.

3. 레이저 피닝의 효과

3.1 잔류응력의 개선

레이저 피닝 처리된 STS304 오스테나이트계 스테인리스강의 잔류응력 분포를 Fig. 4에 나타낸다⁶⁾. 펄스

Fig. 3 Fatigue test results of Inconel718 applied to shot peening and laser peening

Fig. 4 Residual stress depth profile of STS304

에너지 200 mJ, 조사 스폿직경 0.8 mm, 조사밀도 36 pulse/mm²의 조건으로 레이저 피닝 처리를 한 결과, 표면으로부터 약 1 mm의 깊이까지 잔류응력이 형성되었다. 잔류응력의 깊이 분포는 X선회절과 전해연마를 반복하여 구하였다. 그림에서 보이는 실선은 유한요소법에 의한 탄소성 동적해석으로 구한 잔류응력 깊이 분포로서 실험 결과를 잘 나타내고 있다. STS304의 응력-변형곡선 및 푸아송비(poisson's ratio)를 반영하여 플라스마 압력의 시간 변위를 외력 경계조건으로 동적인 응답을 계산하여 산출하였다. 레이저 펄스를 동일한 곳에 조사하게 되면 압축 영역이 더욱 깊이 형성되는 것을 알 수 있다.

열간 금형용 합금 공구강 SKD61에 대한 레이저 피닝 효과를 Fig. 5에 나타낸다. SKD61재의 레이저 피닝시 레이저 조사밀도는 STS304의 조사조건에 비하여 약 3배(100 pulse/mm²)로 하였다.

3.2 피로강도의 개선

오스테나이트계 스테인리스강 STS316L에 대한 회

Fig. 5 Residual stress depth profile of SKD61

Fig. 6 Rotating-bending fatigue test results on STS316L

전굽힘 피로시험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다²³⁾. 두 종류의 열처리한 시험편에 대하여 레이저 피닝 처리한 후 피로시험을 실시하여 각각의 피로특성을 평가하였다. 사전 열처리는 온도 1,100 °C에서 한 시간의 진공 풀림(FA, full annealing) 및 900 °C에서 한 시간의 잔류응력제거 열처리(SR, stress-relieving heat treatment)를 실시하였다. 실험 결과, 피로한도는 레이저 피닝 처리하지 않은 응력제거 시험편에서 240 MPa를 나타낸 반면에 레이저 피닝 처리한 응력제거 시험편에서 약 1.4 배 향상된 340 MPa를 나타내었다. 진공 풀림 시험편은 190 MPa에서 레이저 피닝 처리 후 320 MPa로 약 1.7 배 향상되었다. 즉, 레이저 피닝 처리에 의해 고사이클 피로특성이 개선되었다는 것을 확인할 수 있다.

3.3 응력부식균열 감수성의 저감

STS304 소재에 대하여 온도 620 °C에서 24시간 열연화 처리를 실시한 후 20%의 냉간 압연을 실시하여 50 × 10 × 2 mm^t 크기의 시험편을 제작하였다. 이 시험편에 1%의 인장변형을 가한 후 레이저 피닝 처리를 실시하였다. 응력부식균열을 가속하기 위하여 온도 289 °C, 용존산소 8 ppm, 전도율 0.1 mS/m의 고온·고압의 수중에서 500시간 침적하였다. 그 후 시험편을 길이방향으로 절단하여 단면의 조직을 관찰하였으며, 그 사진을 Fig. 7에 나타낸다²⁴⁾. 레이저 피닝을 처리하지 않은 시험편에서는 결정립계를 따라서 전형적인

Fig. 7 Accelerating SCC test results on STS304

응력부식균열이 발생하였다. 하지만 레이저 피닝 처리를 실시한 시험편에서는 응력부식균열이 관찰되지 않았다. 결과적으로 레이저 피닝 처리에 의해서 재료 표면에 압축잔류응력이 형성되어 응력부식균열의 발생을 방지할 수 있음을 확인하였다. 니켈기 합금 alloy600 및 그 용접금속 alloy182에 대해서도 동일한 시험을 실시하여 레이저 피닝 처리에 의한 응력부식균열 감수성의 저감 효과를 확인하였다²⁴⁾.

4. 레이저 피닝의 적용

4.1 원자력발전플랜트에의 적용

비등수형 원자로(boiling water reactor)의 노심 슈라우드(core shroud)는 스테인리스강으로 제작된 원통형의 용접 구조물로, 용접 열영향부에 응력부식균열을 일으킬 우려가 있기 때문에 미연에 방지하고자 레이저 피닝 처리를 실시하였으며, 그 개념도를 Fig. 8에 나타낸다²⁵⁾.

레이저는 광파이버를 통해서 약 50 m 전송되어 슈라우드의 용접 열영향부에 조사되고, 표면에 압축잔류응력을 형성하였다. 레이저 피닝 속도를 향상시키기 위해서 주파수 60 Hz의 레이저 발진기를 5대 사용하여 그 출력광을 합성함으로써 최대 300 Hz로 피닝 처리를 실시하였다.

레이저 피닝 처리는 슈라우드뿐만 아니라 원자로 압력용기 하부 경판의 제어봉 구동장치 관통부 주위의 용접부에도 적용되었다. 가압수형 원자로(pressurized water reactor)에서는 원자로 용기 하부 경판을 관통하는 중성자 계측기용 파이프 다이 내면 등에 레이저 피닝이 적용되었다²⁶⁾.

Fig. 8 Laser peening system for preventive maintenance against SCC of BWR cor shroud

Fig. 9 Application of laser peening for fan blade

4.2 항공기 부품에의 적용

항공기의 제트엔진은 모래 등의 이물질이 빨아들이면 팬 블레이드에 FOD(foreign object damage)로 불리는 손상이 발생하며, 손상부를 기점으로 고사이클 피로파괴가 일어날 수 있다. 이로 인해 팬 블레이드는 2단 쇼트 피닝 등을 실시하여 표면에 높은 압축잔류응력을 형성시킨다²⁷⁾. 여기에 레이저 피닝 처리를 실시하면 피로강도가 대폭 향상되어 균열 진전을 억제할 수 있다. 미국의 GE사에서는 1992년부터 군용기의 제트엔진 부품에 레이저 피닝 처리하는 연구를 진행하여 1998년경부터 부품의 오버홀(overhaul) 시에 레이저 피닝 처리를 적용하였다. 민간기로는 Fig. 9와 같이 보잉사에서 엔진 팬 블레이드(Ti-6Al-4V 합금제)에 레이저 피닝 처리를 2002년부터 적용하고 있다²⁸⁾.

4.3 원자로 폐기물 처리용기에의 적용

원자로의 폐기물 처리는 세계 각국에서 해결해야 할

Laser peening is a leading candidate to eliminate stress corrosion cracking for nuclear waste disposal

Canisters must survive 10,000 years without stress corrosion cracking

Fig. 10 Structure of canister

Fig. 11 SCC test results on welds of STS316

중요한 과제이다. 미국의 경우는 10,000년간 지하에 매장하는 방식이 결정되었으며, 그로 인해 원자로 폐기물 처리용기의 신뢰성 향상을 위하여 용접부의 레이저 피닝 처리를 검토하였다. Fig. 10은 폐기물 처리용기의 구조를 나타낸다²²⁾. 외측의 용기는 alloy22 재료로 제작되어 있으며, 용접부는 응력부식균열 감수성이 높다.

이에 따른 응력부식균열 시험을 위해 용접부에 대한 레이저 피닝 처리를 실시하였으며, 시험 결과 사진을 Fig. 11에 나타낸다²²⁾. 사진에서 보이는 바와 같이 응력부식균열은 인장잔류응력이 큰 용접 토우부를 따라서 빠르게 진전하고 있다. 하지만 레이저 피닝 처리를 한 영역은 균열이 발생하지 않을 뿐만 아니라 처리 영역을 벗어나고 있는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

다양한 금속 재료에 대해 Nd:YAG 레이저를 사용하여 레이저 피닝 처리를 실시하였으며, 표면으로부터 약 1 mm의 깊이까지 압축잔류응력을 형성할 수 있다는 것을 설명하였다. 그 결과를 통하여 레이저 피닝 처리는 응력부식균열 감수성을 줄이고 피로강도가 향상되며 금속 구조물의 수명 연장에 대한 효과를 확인할 수 있었다.

최근 레이저의 고출력화 및 파이버 전송 기술에 의해서 레이저 피닝 처리의 적용 대상 및 범위가 한층 더 확대되고 있다. 하지만 아직까지 그 적용이 제한적이기 때문에 다양한 연구를 통한 프로세스의 최적화를 통하여 레이저 피닝의 영역을 확대할 필요가 있다.

References

1. A. Kruusing, *Optics and Lasers in Engineering*, 41 (2004), 307-327
2. T. Thorslund, F.-J. Kahlen and A. Kar, *Optics and*

- Lasers in Engineering*, 39 (2003), 51-71
3. C.S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark and Y.-W. Mai, *Int. J. Fatigue*, 24 (2002), 1021-1036
4. A.H. Clauer and D.F. Lahrman, *Key Eng. Materials*, 197 (2001), 121-144
5. Y.J.Fan, Y.N.Wang, S.Vukelic and Y.L.Yao, *Proc. ICALEO*, Oct.31-Nov.3 (2005), 479-488
6. 佐野雄二, 依田正樹, 向井成彦, 小畑稔, 菅野眞紀, 嶋誠之, *日本原子力學會誌*, 42 (2000), 567-573 (in Japanese)
7. A. Demma, G. Frederick and C. King : Proc. 6th Int. Symp. on Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs, September (2006)
8. 沓名 宗春, *日本溶接協會 特殊材料溶接研究委員會* (2007) (in Japanese)
9. R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux and J. Virmont, *J. Appl. Phys.*, 68 (1990), 775-784
10. A.H.Clauer, C.T.Walters, S.C.Ford : ASM Conference on Applications of Laser in Material Precessing, *Los Angeles* (1983), 7
11. D.Devaux, R.Fabbro, L.Tollier, E.Bartnicki, *J.Appl : Phys.* 74 (1993), 2268
12. Warren AW, Guo YB, Chen SC., *Int J Fatigue*, 30 (2008), 188 - 97
13. Rubio - Gonzalez C, Ocana JL, Gomez - Rosas G, Molpeceres C, Paredes M, Banderas A, et al., *Mater Sci Eng*, A 386 (2004), 291 - 5
14. Dorman M, Toparli MB, Smyth N, Cini A, Fitzpatrick ME, Irving PE, *Mater Sci Eng*, 548 (2012), 142 - 51
15. Montross CS, Wei T, Ye L, Clark G, Mai YW, *Int J Fatigue*, 24 (2002), 1021 - 36
16. Zhang XC, Zhang YK, LuJ Z, Xuan FZ, Wang ZD, Tu ST, *Mater Sci Eng*, 527 (2010), 3411 - 5
17. C. Correa, L. Ruiz de Lara, M. Diaz, A. Gil-Santos, J.A. Porro, J.L. Ocana, *International Journal of Fatigue*, 79 (2015), 1 - 9
18. S. Sathyajith, S.Kalainathan n, S.Swaroop, *Optics & Laser Technology*, 45 (2013), 389 - 394
19. E. Maawada, Y. Sanob, L. Wagnera, H.-G. Brokmeiera, Ch. Genzelc, *Materials Science and Engineering*, A 536 (2012), 82 - 91
20. 依田正樹, 佐野雄二, 向井成彦, T. Schmidt- Uhlig and G. Marowsky : *レーザー研究*, 28 (2000), 309-313 (in Japanese)
21. T. Schmidt-Uhlig, P. Karlitschek, G. Marowsky and Y. Sano: *Appl. Phys. B*, 72 (2001), 183-186
22. Lloyd A. Hacke 1 : proc. of SAIL, June 2-4, Williamsburg, US, Paper (2003), #sec6-05
23. Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki and Y. Ochi, *Mater. Sci. Eng. A*, 417 (2006), 334-340
24. Y. Sano, M. Obata and T. Yamamoto, *Welding International*, 20 (2006), 598-601
25. Y. Sano, M. Kimura, K. Sato, M. Obata, A. Sudo, Y.

- Hamamoto, S. Shima, Y. Ichikawa, H. Yamazaki, M. Naruse, S. Hida, T. Watanabe and Y. Oono : Proc. 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8), Baltimore, April (2000)
26. Y. Sano, N. Mukai, M. Yoda, T. Uehara, I. Chida and M. Obata : Proc. Int. Conf. on Application of Photonic Technology (Photonics North 2006, SPIE6343), Quebec

City, June (2006)

27. ショットピーニング技術協會編著 : 金屬疲勞とショットピーニング, 現代工學社, 東京(2004). (in Japanese)
28. Rockstroh : Proc. of ICALEO' 2005, Miami, FL, Oct31-Nov3 (2005), 703-709

- 김종도
- 1963년생
- 한국해양대학교
- 레이저용접 · 클래딩 · 표면처리 및 레이저 가공현상의 계측과 해석
- e-mail: jdkim@kmou.ac.kr

- 유지 사노
- (株)東芝 電力システム社 電力・社會システム技術開發センター
- Laser science, Nuclear engineering
- e-mail: yuji.sano@toshiba.co.jp

- 무네하루 쿠쓰나
- (株)最新レーザ技術研究センター
- Laser Materials Processing, Welding Engineering, Metal Working
- e-mail: altrec-kutsuna@nifty.com