

유한요소법에 의한 광폭 레이저 표면경화의 잔류응력해석

김재도*, 맹주원**

Residual Stress Analysis for Wide-band Laser Heat Treatment Using Finite Element Method

Jae Do Kim* and Ju Won Maeng**

ABSTRACT

In this paper, the residual stresses for the wide-band laser heat treatment using a polygon mirror have been analyzed. The results of FE analysis are compared with the experimental results. ANSYS Version 5.3, a commercial FE-code, is used for the FE stress analysis. The structural analysis was performed on after thermal analysis. The residual stress distribution across the hardened area was measured by the X-ray diffraction technique. The laser hardening conditions, 2kW laser power and 2mm/s travel speed, were used for the experiment and the FE analysis. Analysis results, which is maximum tensile residual stress is about 143MPa and maximum compressive residual stress is about -380MPa. Under same parameters with the analysis, experimental results indicate that MTRS is about 152MPa and MCERS is about -312MPa. The experimental results is about 6% higher than the FE analysis. As a result, residual stress data from the experiment close well with that of the FE analysis.

Key Words : Wide-band laser heat treatment (광폭 레이저 표면경화), Polygon mirror (폴리곤 미러), Residual stress(잔류응력), CO₂ laser (CO₂ 레이저), Finite element method (유한요소법)

1. 서론

지금까지 발전되어온 레이저 가공기술은 내부 식성, 내식성, 내마모성을 얻기 위한 국부적 가공이 주를 이루고 있어 넓은 면을 가공하기 위해서 중첩가공을 하였다. 중첩 방법은 여러 번의 가공에 따른 가공비용과 가공시간 면에서 비경제적이며 중첩된 부분에서 경도저하 현상이 일어난다. 보통 2kW CO₂ 레이저를 사용하였을 경우 종래의

방법으로는 빔 폭이 약 3mm 정도이다. 또한 기존의 광폭 가공을 위한 시스템은 설계, 제작 및 제어기가 복잡하여 고비용의 문제점이 있었다. 이러한 국부가공과 시스템의 문제점을 해결하기 위해 새로운 광폭 빔 장치가 필요하게 되었다.

광폭 빔을 만들기 위한 방법으로 폴리곤 미러 (polygon mirror)를 이용하였다. 폴리곤 미러는 일정한 폭과 조사수(frequency)를 가진 선형적인 열원을 제공한다. 이러한 폴리곤 미러를 이용한 광폭빔

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교, 한국과학재단 인턴연구원

폭 빔 장치에 의한 레이저 표면경화에 대한 연구는 매우 적은 실정이다. 광폭 빔 장치를 통해서 생성된 빔의 형태는 일반적인 스폿 빔(spot beam)과 다른 형태이며, 이에 따라 경화된 영역이 스폿 빔에 의한 것 보다 더 넓은 영역을 표면경화할 수 있다. 광폭 빔의 단일 패스(single pass)에 의한 경화영역의 폭은 주로 레이저빔의 패턴, 레이저 출력, 그리고 이송속도에 의해 영향을 받는다.^(1,2) 이 세 가지 조건들에 대한 온도해석으로 흡수율을 예측하여 광폭 빔 표면경화 시 사전에 가공변수를 선정하므로 생산성 향상에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 폴리곤 미러를 이용한 광폭 빔 장치에 의해 생성된 레이저 표면경화 층의 잔류응력을 유한요소 해석과 실험을 통해 결과를 비교하고 실제 작업 전에 필요한 가공변수를 선정하는 데 있다. 레이저 표면경화 처리에 의해 발생하는 잔류응력은 급격한 열적구배와 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 일어나게 될 때 급속히 냉각되는 동안 마르텐사이트 변태가 체적 증가를 가져오게 되는데 이것이 압축잔류응력을 생성시킨다. 그러므로 재료표면의 상승 온도와 급격한 열적구배에 따른 응력값은 매우 중요한 변수가 된다.⁽³⁾ 표면경화층이 압축잔류응력하에 있게 되므로 마모저항 및 피로수명이 증가된다. 따라서, 가공 후 레이저 표면경화부위의 정확한 응력해석을 함으로써 보다 향상된 기계적 성질을 얻을 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 유한요소해석 모델

Fig. 1은 해석에 이용된 유한요소 모델이다. 해석에는 8절점 평면변형률 요소가 사용되었고 총 요소수는 1300개로 하였다. 해석에 사용된 유한요소 상용프로그램은 ANSYS Version 5.3이다.

Table 1은 해석과 실험에서 사용된 재료의 화학 성분이고 Table 2는 재료의 기계적 성질이다. Table 3은 각각의 온도에 대한 재료의 물성치이다.

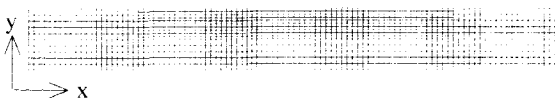


Fig. 1 FE model for analysis with ANSYS

Table 1 Chemical compositions of SCM440 (wt. %)

	C	Si	Mn	Cr	Mo
SCM440	0.40	0.25	0.70	0.90	0.25

Table 2 Mechanical properties of SCM440

Yield strength (MPa)	Hardness (HB)	Elongation(%)
655.0	302	17.7

Table 3 Material properties for FE Analysis

Temperature (°C)	100	200	300	400	500	600
Thermal conductivity (W/mK)	42.7	42.3	42.44	43.7	38.4	33.1
Specific heat (kJ/kgK)	453	473	496	519	561	754
Temperature (°C)	700	800	900	1000	1100	-
Thermal conductivity (W/mK)	33.24	33.38	33.52	33.66	33.8	-
Specific heat (kJ/kgK)	1075	823	802	807	813	-

2.2 해석 과정

본 연구에서는 폴리곤 미러를 이용한 광폭 빔 장치에서 생성된 레이저빔에 의한 표면경화의 온도 분포와 잔류응력을 해석하였다. 재료의 폭 방향으로 나타나는 온도 분포와 잔류응력분포가 중요하므로 2차원 직각 좌표계에서 해석하였다. 온도해석을 위해 복사 열전달을 무시하고 재료는 등방체로 취급하였고 평면 물체 표면으로의 열전도에 대한 해석만을 수행하였다. 재료에 입사되는 레이저빔은 폭 15mm로 하였으며 측정된 광폭 빔의 형태와 유사한 사각형 모드 빔으로 가정하였다. 폴리곤 미러에서의 에너지 손실과 이송방향에 따른 입열량의 변화는 없다고 가정하였다. 재료의 물성치는 온도에 따라 단계적으로 변하는 물성치를 적용하였다. 단계적인 해석 과정은 먼저 열해석을 수행한 후 그 결과를 가지고 구조해석을 하였다. 잔류응력해석 과정은 Fig. 2에 나타내었다.

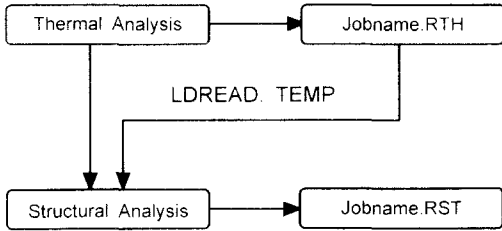


Fig. 2 Process of thermal stress analysis

Table 4 Laser hardening parameters

Laser power	2 kW
Beam mode	Multi mode
Travel speed	2, 2.33, 2.67, 3 mm/s
Incident beam diameter to polygon mirror	3
Shielding gas	No use
Coating	No use

3. 레이저 표면경화 실험 및 잔류응력 측정

3.1 실험 재료

본 연구에 사용된 시편은 크랭크 축, 치차, 캠축, 선박용 디젤엔진의 피스톤 재질 등에 많이 사용되는 SCM440이다. 시편의 크기는 50×82×5mm로 제작하였고 시편의 표면에는 일반적으로 흡수율을 높이기 위해 사용하는 코팅은 하지 않았으며 밀링 가공한 면을 그대로 레이저 열처리하였다. 시편은 표면경화 전에 아세톤으로 표면을 세척하였다.

3.2 레이저 표면경화

레이저 표면경화 처리조건은 표면경화처리가 가능한 조건인 용융이 일어나지 않는 범위 내의 빔 조건으로 하였다. 폴리곤 미러에 입사하는 빔 직경과 출력은 일정하게 하고 이송속도를 변화시켜 실험하였다. 보호가스는 사용하지 않았으며 레이저빔은 직경이 약 3mm의 멀티모드(multi mode)를 사용하였다. 레이저 표면경화 처리조건은 Table 4와 같고 장치 구성은 Fig. 3과 같다.

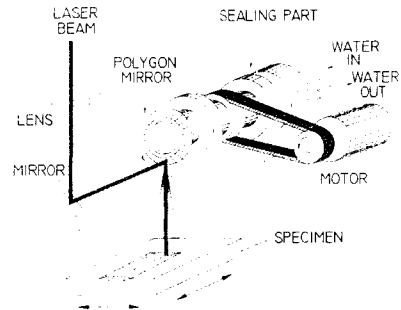


Fig. 3 Schematic diagram of optical system for wide-band laser beam

3.3 잔류응력 측정

잔류응력 측정은 X-선 회절기를 이용하여 측정하였다. X-선을 이용한 잔류응력측정은 시편표면을 전해 연마한 후 회절선 최대강도를 찾아서 그 값을 기준으로 강도의 이동된 2θ 값을 반가폭 중점법으로 측정하였으며, 면간 거리 d₀의 변화에 대한 sin²ψ 선도를 그려 그 기울기로서 응력을 산출하였다. 잔류응력측정 위치는 빔 방향에 대하여 횡방향으로 측정하였다. 2θ를 156.08°로 하고 Detector로 φ를 -20° ~ 20°로 경사시켜 회절실험을 하였다.^{(11-13), (19)}

4. 결과 및 고찰

4.1 온도분포 해석

유한요소 상용프로그램을 이용하여 온도분포를 해석하였다. Fig. 4는 출력 2kW, 이송속도 2mm/s를 선택하고 흡수율 20%로 하여 레이저 빔 조사시간이 0.01초 후 일 때의 온도분포 결과를 도시한 것이다. 재료의 표면 중심 부분에서 최고 온도는 약 1353℃ 정도였다. 광폭 빔을 중점적으로 받은 재료의 표면 중앙 부분에서 방사형으로 열확산이 이루어지고 있다. 실제 실험을 통해 얻어진 온도 분포와 비교해 볼 때 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

4.2 경화폭과 경화깊이 해석

본 연구에서 사용된 SCM440은 오스테나이트화 온도가 840℃이므로 이 온도를 이용해서 경화

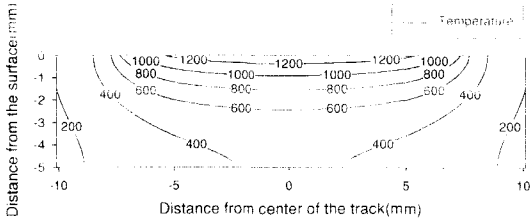


Fig. 4 Temperature field (P=2kW, absorption=20%, V= 2mm/s)

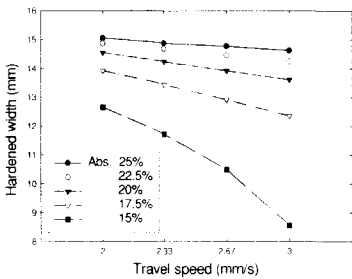


Fig. 5 Hardened width at 2kW, various travel speed

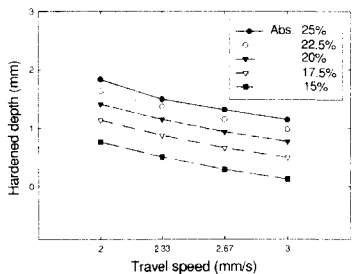


Fig. 6 Hardened depth at 2kW, various travel speed

폭과 경화깊이를 결정하였다.

레이저 출력이 2kW일 때 이송속도에 따른 경화폭과 경화깊이는 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 경화폭은 약 9~15mm 정도였고 경화깊이는 약 0.5~2mm로 계산되었다. 실험에서도 같은 조건으로 경화폭을 관찰하였다. 광폭빔에 의한 경화폭은 15~16mm로 나타났다. 경화폭의 해석값과 실험값을 비교해 볼 때 약 8% 정도의 오차를 가져 거의 일치하는 경향을 보였다. 흡수율이 높을수록 경화폭과 경화깊이가 증가함을 알 수 있었다. 일반적으로 광폭빔의 단일 패스(single pass)에 의한 경화폭

은 주로 레이저 빔의 패턴, 레이저 출력, 그리고 이송속도에 의해 경향을 보인다. 이 때 기저 조건들은 빔의 조사 영역, 가열 및 냉각 속도를 결정하여 경화폭에 영향을 주게 된다. 경화폭은 레이저 빔의 직경이 클수록 레이저의 출력이 높을수록 증가한다.¹²⁾

4.3 잔류응력 해석

광폭 빔에 의한 레이저빔 표면경화 후 잔류응력을 해석하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 레이저 출력이 2kW이고 흡수율이 각각 20%와 25% 일 때 이송속도에 따른 잔류응력을 해석한 것이다. 전체적인 잔류응력 분포의 경향은 열원이 가해진 경화된 영역에서는 압축잔류응력이 나타났으며 경화된 부위 바깥부분에서는 인장잔류응력이 나타났다. 특히 경화부위의 경계부분에서 높은 압축잔류응력이 나타났다. Fig. 7에서 이송속도가 2mm/s 일 때 최대 인장잔류응력은 약 191MPa 정도였고 최대 압축잔류응력은 약 -507MPa 정도로 해석되었다. 이송속도가 증가할수록 잔류응력값은 감소하는 경향을 보였다. 이송속도가 빠를수록 재료 내에서 경화하는 시간이 짧아지므로 냉각되는 시간 또한 짧아지게 된다. 따라서, 잔류응력값이 작아지게 되는 것이다.

Fig. 8은 흡수율이 Fig. 7에 비해 높기 때문에 잔류응력값이 크게 나타났다. 레이저 출력이 2kW, 흡수율이 25%이고 이송속도가 2mm/s 일 때 최대 인장잔류응력값은 약 239MPa 정도였고 최대 압축잔류응력값은 약 -634MPa 정도로 해석되었다. 흡수율이 20% 일 때와 비교해 볼 때 잔류응력값이 20% 정도 높게 나타났다. Fig. 9는 잔류응력 분포를 경

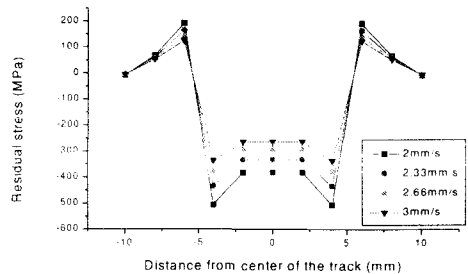


Fig. 7 Distribution of residual stress on surface layer in hardened zones (P=2kW, absorption=20%)

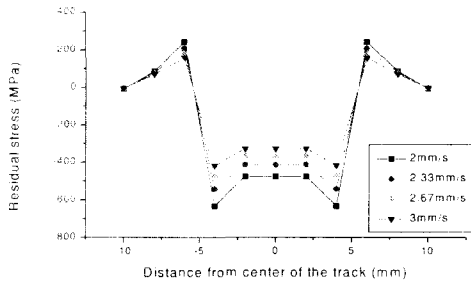


Fig. 8 Distribution of residual stress on surface layer in hardened zones (P=2kW, absorption=25%)

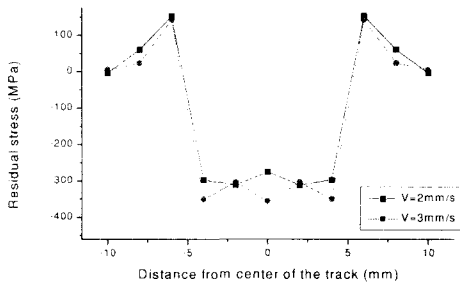


Fig. 9 Distribution of residual stress on surface layer in hardening zones

좌측 방향으로 실험 측정된 것이다. 레이저 출력은 2kW로 하고 이송속도만 바꾸어 잔류응력을 측정하였다. 이송속도 2mm/s 일 때 최대 인장잔류응력은 약 152MPa 정도이고 최대 압축잔류응력은 약 -312MPa 정도로 측정되었고, 이송속도 3mm/s 일 때 최대 인장잔류응력은 약 142MPa 정도이고 최대 압축잔류응력은 약 -356MPa 정도로 측정되었다. 재료에 열을 가하면 열원 주위에서 압축잔류응력이 발생하고 소성변형이 발생하며, 온도가 계속 상승함에 따라 항복응력이 저하하여 압축응력은 감소하나 계속 가열하고 있기 때문에 압축응력 영역은 늘어난다. 실험에서 경화부위의 경계부분에서 높은 압축잔류응력을 나타내고 있는데 이것은 빠른 냉각 속도에 의한 것이다. 경화구역 바깥부위에서는 인장잔류응력이 존재하며 이것은 내부 미소크랙의 발생의 가능성을 가지고 있게 된다. 해석을 통해 구한 잔류응력의 분포를 비교해 볼 때 거의 같은 경

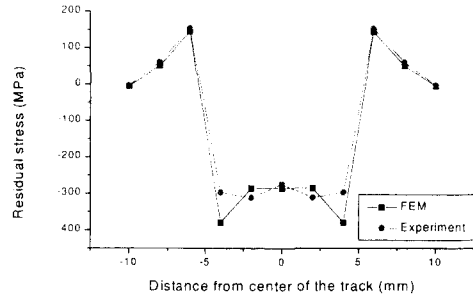


Fig. 10 Comparison of residual stress (P=2kW, absorption=15%, V=2mm/s)

향을 보이고 있다.

Fig. 10은 레이저 출력이 2kW, 흡수율이 15% 그리고, 이송속도가 2mm/s일 때, 잔류응력에 대한 유한요소해석값과 실험값의 비교를 보여주고 있다. 잔류응력에 대한 해석에서 최대 인장잔류응력값은 약 143MPa 정도였고 최대 압축잔류응력값은 약 -380MPa 정도였다. 이 결과는 레이저 출력 2kW, 흡수율 20%, 이송속도 2.67mm/s 일 때의 해석 결과와 비슷한 값을 보였다. 해석과 같은 조건에서 측정된 최대 인장잔류응력값은 약 152MPa 정도였고 최대 압축잔류응력값은 약 -312MPa 정도였다. 해석값과 실험값을 비교해보면 실험값이 약 6%정도 높게 나타났다.

5. 결론

본 연구는 폴리곤 미러를 이용하여 만들어진 광폭 빔의 레이저 표면경화에 있어 유한요소 해석의 만족스러운 결과를 확인하였다. 잔류응력에 대한 실험과 상용유한요소프로그램을 이용한 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이송속도에 따른 경화폭과 경화깊이는 이송속도가 증가할수록 감소하였고 이송속도가 감소할수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 이송속도가 낮을수록 레이저와 재료의 상호작용시간이 길어져 폭 방향으로의 입열량이 증가하기 때문이다. 해석값과 실험값에서 약 8%의 오차를 보였다.
- (2) 열원이 가해진 경화된 영역에서 압축잔류응력이 타났으며 경화된 부위 바깥부분에서는 인장잔류응력이 나타났다. 특히 경화부위의 경계부분에서 높은 압축잔류응력이 나타났다. 해석값과

실험값에서 약 6%의 오차를 보였다. 해석에서는 몇 가지 가정들과 조건이 주어져 예상했던 결과가 나왔다. 실험에 있어서는 여러 가지 측정 오차가 발생하여 해석에서처럼 안정적인 결과를 보이지는 않았지만 잔류응력 분포의 경향을 관찰하기에는 충분하였다.

(3) 유한요소해석을 통한 광폭 빔에 의한 표면경화시 잔류응력값과 X-선 회절기를 사용하여 측정된 잔류응력값이 거의 일치하는 경향의 결과를 보이고 있다. 이 결과로 광폭 빔에 의한 레이저 표면경화에 있어 유한요소해석을 통한 온도해석 및 잔류응력해석은 유용한 것으로 나타났다. 따라서, 실제 작업 전에 해석을 통해 가공변수를 선정하므로 생산성 향상에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Xi-Chen, Y., Bao-Qi, W., Xin, Z. and Yun-Shan, W., "Laser Cladding by 10kW CO₂ Laser wide-band Scanning Pyramid Mirror," ICALEO' 94, pp. 178-186, 1994.
2. Xi-Chen, Y. and Yuhe, Y., "Laser Cladding with Wide-band Scanning Rotative Polygon Mirror," Chin. J. Met. Sci. Technol., Vol. 6, pp. 50-56, 1990.
3. Kim, J. D., "Prediction of the Penetration Depth in laser Beam Welding," J. of KSME, Vol. 4, No. 1, pp.32-39, 1990.
4. 失川元基と 官崎則幸, 有限要素法による熱應力・クリープ・熱傳導解析, 사이エンス社, pp. 162-174, 1985.
5. Jeanmart and Bouvaist, J., "Finite Element Calculation and Measurement of Thermal Stresses in Quenched Plates of High Strength 7075 Aluminum Alloy," International Symposium on the Calculation of Internal Stresses in Heat Treatment of Metallic Materials, Linköping, Sweden, May, 1984.
6. Masubuchi, K., Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980.
7. Sanders, D. J., "Temperature Distributions Produced by Scanning Gaussian Laser Beams," Applied Optics, 23(1), pp. 30-35, 1984.
8. 김재도, "12%-Cr강의 CO₂ 레이저 표면경화에서 금속조직과 경도분포," 대한기계학회논문집, 제16권, 제10호, pp. 1861-1868, 1992.
9. 김재도, 조용무, "금형용 합금공구강 STD11의 레이저 표면경화특성," 한국열처리학회논문집, 제6권, 제4호, pp. 230-236, 1993.
10. 정원기, "구상흑연주철의 CO₂ 레이저 표면경화 특성," '97춘계학술대회논문집, 한국정밀공학회, pp. 998-1002, 1997.
11. 송영기, 서성재, "피스톤 링 그루브의 레이저 열처리," 한국열처리학회지, 제10권, 제3호, 9월, pp. 165-171, 1997.
12. 정재경, "폴리곤 미러를 이용한 광폭 레이저 표면경화," 석사학위논문, 인하대학교, 인천, 1999.
13. Hull, D. M. and Stewart, A., "Laser Beam Profiles Principles and Definition," Laser & Applications, Oct., pp. 75-80, 1985.
14. Solina, A., et al., "Origin and Development of Residual Stresses Induced by Laser Surface Hardening Treatments," J. of Heat Treating, Vol. 3, No. 3, June, 1984.
15. Desanctis, M., "Residual Stresses Induced by localized Laser Hardening Treatments on Steels and Cast Iron," J. of Heat Treating, Vol. 4, No. 3, pp. 272-281, June, 1986.
16. Barctt, C, S., "Internal Stress," J. of Metals and Alloys, Vol. 5, pp. 131-154, 1984.
17. Lin, R., "A Study on Residual Stresses and Microstructures of Two Laser Hardened Steels," Linköping, University Institute of Technology, Jan, 1988.
18. Kunlin, W., Yunming, Z., Zhijuan, D. and Renji, Z., "Microstructure and Property of Laser Transformation Hardening on Sheet Steel with High Carbon Content," ICALEO '95, pp. 85-90, 1995.
19. 권재도, 진영준, 장순식, "레이저빔 조사에 의한 열화재의 내식성 향상 방법 개발," 대한기계학회논문집, 제19권, 제11호, pp. 2954-2961, 1995.
20. Mohiuddin, G., Duley, W. W. and Uddin, M. N., "Laser Surface Engineering of Automotive Components," ICALEO '95, pp. 231-240, 1995.
21. 김홍준, 최우천, 김숙환, 권영각, "레이저 및 전자빔을 이용한 표면 열처리," 대한기계학회논문집, 제19권, 제2호, pp. 427-432, 1995.