

유한요소법을 이용한 탄소강의 경화특성에 관한 연구

황현태* · 소상우* · 김종도**[†]
*(재)울산테크노파크, **한국해양대학교

A Study on Hardening Characteristics of Carbon Steel by Using Finite Element Method

Hyun-Tae Hwang*, Sang-Woo So*, Jong-Do Kim**[†]

*Ulsan Technopark, 342-1 Maegok-dong, Buk-gu, Ulsan 683-420, Korea

**Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

Abstract Recently, from general machine parts and automobile parts using carbon steel to a mold, there has been efforts for improving durability and attrition resistance of these parts. Especially, heat treatment with laser which works fast and automatically can be used for the mass production with high quality. Moreover, local heat treatment can be used to handle with complex and precise parts. Accordingly, we analyzed hardening characteristics of carbon steel using the finite element method and compare the experimental results to have more reliability. We also proved the cause of thermal deformation with temperature and stress distribution by heat treatment. After these analysis and experimental, we found that each maximum hardness of the two tests was 728 Hv and 700 Hv, on condition of 1050°C heating temperature, and 2 mm/sec laser speed. We also found that difference of surface stress-distribution was occurred, and this makes deformation mode up after heat treatment.

(Received May 25, 2011; Revised June 14, 2011; Accepted July 20, 2011)

Key words: HPDL(High power diode laser), Laser surface treatment, Carbon steel

1. 서 론

레이저를 이용한 열처리는 부품의 경화특성을 높이는 방법으로 내마모성의 증가는 물론 외부의 발생 열이나 하중에 대해 견딜 수 있도록 기계적 성질을 개선시킬 수 있다. 이러한 레이저 열처리는 물리적, 화학적 경화방법에 비해 특정 부위만을 효율적으로 경화시킬 수 있다. 또한 비접촉 방법이며, 고밀도에 에너지를 통해 열영향부를 최소화시킬 수 있다. 다이오드 레이저는 기존 가우시안 빔 프로파일을 갖는 CO₂, Nd:YAG 레이저와 달리 레이저 조사부위에 거의 균등한 에너지밀도로 표면을 가열할 수 있고, 레이저 빔의 반사율이 작기 때문에 표면경화 열처리에 보다 적합하다.

레이저 열처리 공정변수로는 레이저 종류, 빔의 출력, 형태, 속도 등이 있고 가공 재료 및 형태 등에 따른 적정 조건 설정이 필요하다. 따라서 이를 위한 실험이나 해석을 통해 관련연구들이 활발히 진행되고

있다[1-4].

주로 많이 사용되는 탄소강, 합금강 등에 대해 CO₂, Nd:YAG 레이저를 이용한 경화실험과 조건별 열처리 범위, 조건변화, 경도 등의 관찰 및 측정분석을 통한 많은 실험연구와 해석을 통한 열처리범위, 잔류응력 등의 예측과 실험검증을 내용으로 하는 연구 등이 진행되어 왔다[5-7]. 그리고 최근 고출력 다이오드 레이저(HPDL)의 개발로 그 적용범위가 확대되고 있으며 이를 이용한 합금강 표면경화 열처리에 대해 실험적, 해석적 연구들이 진행되고 있지만 다양한 재질에 대해 레이저 열처리 조건 설정에 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD를 이용하여 다이오드 레이저를 통한 사출 금형소재(HP4MA)의 표면경화 열처리에 관한 시뮬레이션을 하고, 그 결과를 동일조건도의 실험과 비교·분석하였다. 입열조건으로 다이오드 레이저 빔 사이즈를 40×7 mm로 사용하였으며, 해석을 통해

[†]Corresponding author. E-mail : jdkim@hhu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of the specimen

Element (wt%)	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
Material						
HP4MA	0.33~0.37	0.15~0.35	0.80~1.00	0.40~0.50	1.65~1.75	0.40~0.50

열처리 조건을 예측하였다. 이를 실험적으로 비교 검증함으로써 해석적 방법을 통한 적정 열처리조건 설정의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 사용재료

본 연구에서 사용된 재료는 진공탈가스 처리한 강 피로 단조하여 생산되기 때문에 재질의 청정도가 높고 기공이 없으며, 성분의 편석 또는 기타 유해한 결합이 적은 소재이다. 따라서 금형소재 및 기계부품 소재로 많이 사용되고 있어 국부적으로 기계적 특성을 달리하여 부품의 내구수명을 향상시키기에 유리하다.

시험편은 레이저열처리 후 자기냉각(self quenching) 효과를 고려하여 90×50×30 mm로 제작하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 재료의 화학적 조성을 나타내었다.

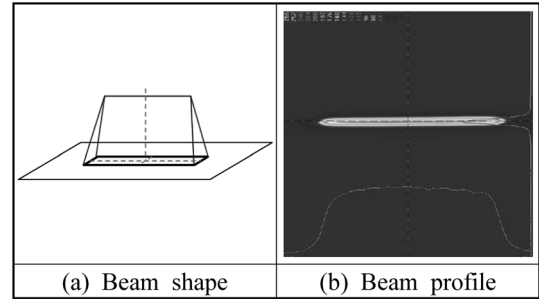
3. 실험 및 해석 방법

3.1 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 레이저열처리 장비는 고풍력 다이오드 레이저 장비로 최대출력이 4.0 kW이며, 레이저 빔은 직경이 400 μm의 파이버로 전송된다. 레이저 빔 사이즈는 40×7 mm의 열처리 광학렌즈를 사용하였고, 레이저의 WD(working distance)는 235 mm이다. 시험편의 온도측정을 위하여 2색 적외선 온도계(two color pyrometer)가 부착되어 있으며, 측정지점은 빔조사부의 중앙이며 측정온도의 범위는 350~1,300°C이다. 또한, 온도제어는 유한요소해석과 비교 분석을 위해 적외선 온도계를 통해 측정된 온도를 통하여 레이저출력이 자동조절 되게 구성하였다.

3.2 유한요소해석 방법[5-7]

레이저에 의해 공급되는 열원은 시험편에서 복잡한 열 사이클이 진행되며, 이것은 비선형이며 3차원 비

**Fig. 1.** Focusing characteristic of diode laser beam.

정상 상태이다. 그러나 레이저열처리 해석시간을 단축하기 위하여 재료는 등방체로 가정하여 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화특성을 분석 하였다. 따라서 열처리 조건을 찾기 위해 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화특성의 경우 2차원 비정상상태의 해석을 실시하였다.

레이저 열처리 후 시험편의 온도 분포와 응력 분포를 통한 열변형 원인을 증명하기 위해 사각형으로 구조화된 빔을 사용하여 3차원 비정상상태 해석을 실시하였다. 이는 레이저 열원이 시험편에 조사되어 열에너지로 시험편 내부로 열전달 되고 시험편 표면에서는 자연대류조건으로 경계조건을 설정하였다.

본 연구에 사용된 레이저의 빔 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 이와 같이 레이저의 빔 특성은 횡단면의 에너지밀도 분포가 매우 균일함을 볼 수 있고 종단면의 분포는 가우시안형태로 중심부에 에너지가 집중된 형태이다. 따라서 열원의 이동방향에 대해 선형열원의 수평과 수직 배치는 열처리범위에 큰 차이가 있음을 예상 할 수 있다. 즉, 동일한 빔의 출력과 속도 조건에서 열원 이동선상과 수평 배치의 열처리 범위특성은 수직 배치에 비해 폭이 좁고 보다 깊은 열처리가 가능하다. 따라서 Fig. 2와 같이 열 해석에 있어서 선형 열원도 그 일정한 폭값이 있으므로 보다 정확한 입열 경계조건 설정을 위해서는 열원 이동선상의 요소분할을 매우 작게 하여 열원 폭의 영향을 해석에 반영하였다.

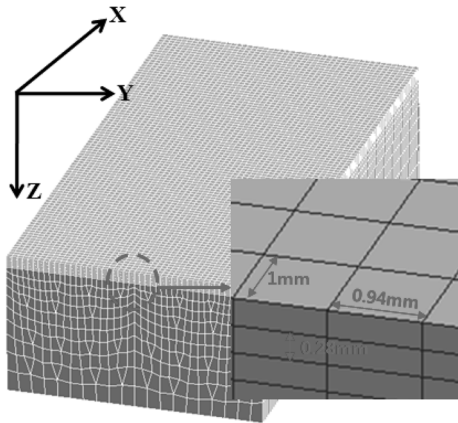


Fig. 2. Modeling of 3D analysis.

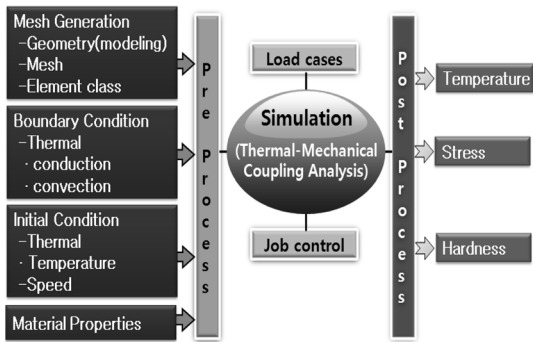


Fig. 3. Flow chart of thermo-mechanical coupling analysis.

또한 절점(node) 사이의 간격은 레이저 빔 크기 내에서는 등간격이 되도록 하였으며, 그 외의 부분은 지수 함수적으로 증가하도록 설계 하였다. 레이저의 열입력은 레이저출력에 대응하는 열처리 온도의 값으로 900~1,050°C 사이에서 50°C 간격으로 해석 후 온도의 영향에 따른 경화폭 및 경화깊이를 살펴보았다. 레이저 빔의 이송속도는 2~5 mm/sec 사이에서 1 mm/sec 간격으로 해석 후 레이저 빔의 이송속도에 따른 경화 특성을 분석하였다. Fig. 3은 상용유한요소해석 프로그램인 SYSWELD를 이용하여 열해석 및 열-응력 해석 공정을 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 공정변수에 따른 경화특성

본 연구에서 사용된 소재에 대한 경화특성을 파악하기 위해 주된 공정변수인 열처리 온도 및 레이저

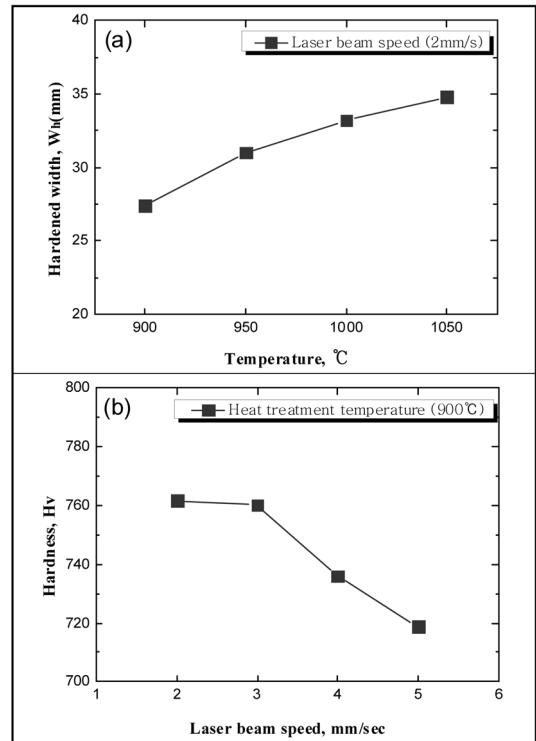


Fig. 4. Variations of Vickers hardness at the hardened zone; (a) hardened width by temperature control and (b) hardness by laser speed control.

빔의 이송속도를 변화시키면서 레이저 열처리를 실시하였다. 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec로 고정하고 열처리 온도를 900~1,050°C 사이에서 50°C 간격으로 실시하고, 열처리 온도 1,050°C로 고정하고 레이저 빔의 이송속도 2~5 mm/sec 사이에서 1 mm/sec 간격으로 변화시키면서 열처리를 실시하였다.

열처리 온도의 경우 레이저 빔이 시편 표면에 입사되어 시편의 입열량의 증감으로 인해 경화 특성에 영향을 미치는데 열처리 온도가 낮을 경우 입열량이 적으므로 열처리 능이 감소하여 경화폭이 낮아진다. 또한 열처리 온도가 너무 높을 경우 입열량의 과다로 시편의 표면이 용융하게 된다. 표면을 용융시키지 않고 열처리하기 위해서는 입열량, 즉 열처리 온도 제어가 필수적이다. 따라서 Fig. 4(a)에서 보는 것과 같이 측정된 온도가 증가 할수록 경화폭이 선형적으로 상승하는 경향을 나타내었다. Fig. 4(b)는 레이저 빔의 이송속도에 따른 표면경도를 나타낸 것으로 레이저 빔의 이송속도의 증가에 따라 근소하게 감소하

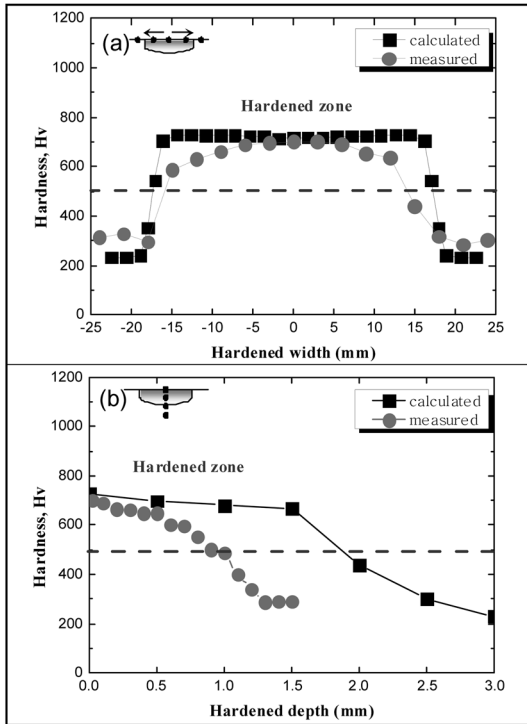


Fig. 5. Variations of hardness at laser-hardened zone; (a) hardened width and (b) hardened depth.

는 경향을 보였다.

Fig. 5는 열처리 온도 1050°C, 레이저 빔의 이송 속도 2 mm/sec에서의 실험과 해석을 통한 경화폭 및 경화깊이를 나타내었다. 이때 경화부의 평가는 한국산업규격 ‘강의 화염 경화 및 고주파 경화층 깊이 측정방법’(KS D 0027)에서 쿨링 템퍼링한 경화층의 표면에서 경도값 500 Hv를 유효 경화층의 한계 경도로 정의하였다. 따라서 실험 및 해석에서의 최대 경도는 각각 700 Hv, 728 Hv로 나타났다. 경화폭의 경우 28.7 mm, 34.7 mm, 경화깊이는 0.91 mm, 1.87 mm로 나타났다. 최대경도의 경우 실험과 해석 결과가 비슷하게 나타났으나 경화폭 및 경화깊이의 경우 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 실험 및 해석에 사용된 레이저 빔 사이즈 40×7 mm일때 해석의 경우 레이저 빔이 형상손실 없이 100% 시험편에 전달된다는 가정으로 해석하였기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 해석을 통한 열처리 최적 조건을 판정하는데 활용한다면 시간과 경비 절감을 할 수 있을 것으로 판단된다.

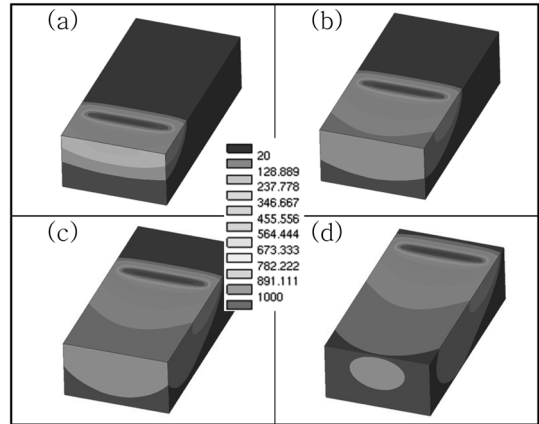


Fig. 6. Variations of surface temperature during laser heating on condition of 1,050°C heating temperature and 2 mm/sec laser speed; (a) 10 sec, (b) 20 sec, (c) 30 sec and (d) 40 sec.

4.2 열처리 해석에서의 온도 및 응력 분포

Fig. 6은 실험 소재에 대한 레이저 열처리 해석에 따른 시간별 온도 분포를 나타내었다.

이때 열처리 조건으로 열처리 온도 1,050°C, 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec로 해석을 실시하였다. 해석결과 열처리 시작 후 10~40 sec 사이에서 10 sec 간격으로 나타내었으며, 레이저 열처리 해석시 레이저 빔의 이송에 따라 시험편 표면에 열에너지가 조사되어 시간 경과에 따라 시험편내부로 열전도와 측벽부로의 대류에 의해 시험편이 냉각되는 것을 알 수 있다. 이를 통해 열처리 해석 결과 두께방향으로 시간의 경과에 따라 두께방향 뒷면까지 열전도가 잘 되어 충분한 두께를 가지고 있다고 판단되며, 폭 방향으로는 열전도보다 대류의 효과가 큰 것으로 관찰된다. 따라서 폭방향의 열전도의 효율이 낮아지면 입열량에 비해 자기냉각 효과가 떨어져 열처리 후 폭방향 경화폭에 영향을 미치는 요인이 된다.

Fig. 7은 Von Mises Stress로 응력값이 항상 0보다 크며, 해석결과에서도 인장 및 압축과 관계없이 응력의 크기만 알 수 있다. 따라서 Von Mises Stress 최대응력은 680 MPa로 나타났다. 이는 잔류응력으로 남아 시험편의 변형을 유발하게 되는 원인이 된다.

4.3 열처리 후 응력 분포에 따른 변형특성

Fig. 8은 열처리 후 변형량 예측을 위해 실험 및

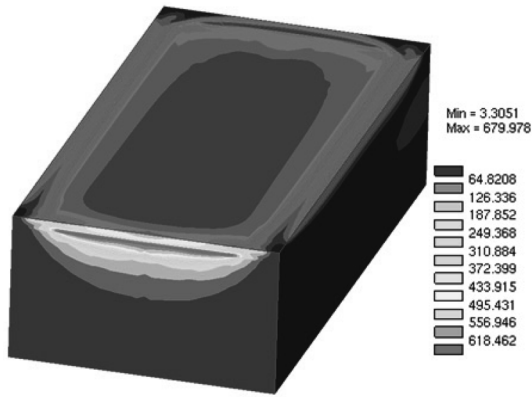


Fig. 7. Von mises stress after heat treatment on condition of 1,050°C heating temperature and 2 mm/sec laser speed.

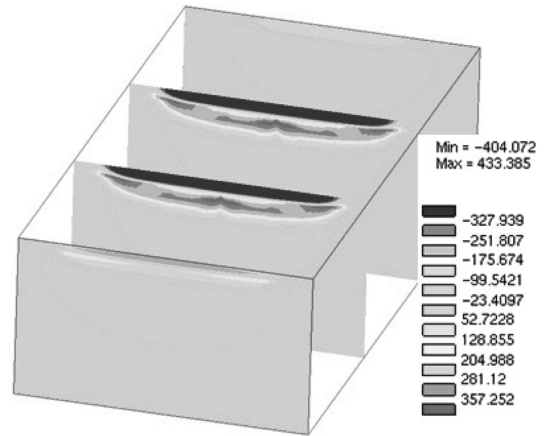


Fig. 9. Mean stress after heat treatment on condition of 1,050°C heating temperature and 2 mm/sec laser speed.

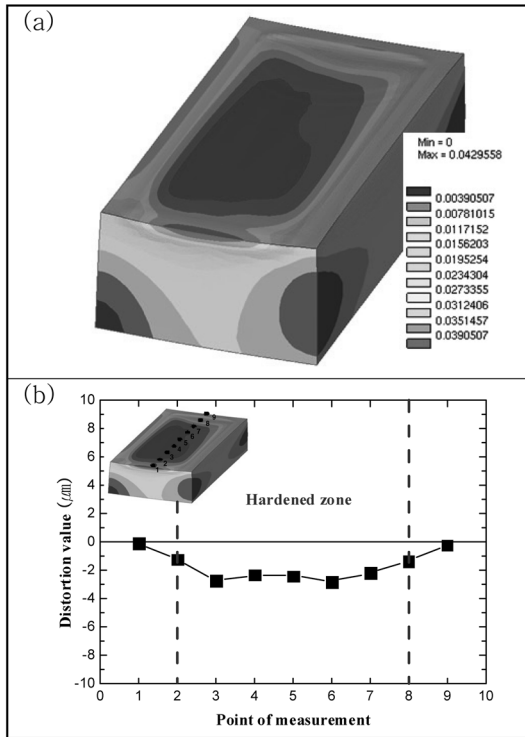


Fig. 8. Distortion after heat treatment on condition of 1,050°C heating temperature and 2 mm/sec laser speed; (a) analyzed results and (b) experimental results.

해석에 대해 변형량을 나타내었다. 실험 및 해석에서의 열처리 조건으로 열처리 온도 1,050°C, 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec로 하고 열처리 전·후 변형량을 비교하였다. 실험에서의 변형량 측정은 접촉

식 3차원 측정기를 이용하여 측정하였다. 해석에서의 변형량은 시각적으로 보여지게 하기위해 30배 확대하여 나타내었으며, 최대 변형량도 30배로 확대하여 절대값으로 나타낸 것이다.

변형량 분석결과 해석을 통한 최대 변형량은 1.4 μm 로 나타났고, 실험에서의 최대 변형량은 2.8 μm 로 나타났다. 이는 해석에서의 변형량보다 실험에서의 변형량이 크게 나타났으나, 열처리 실험 전 변형 예측을 하는데는 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 실험에서의 변형량은 열처리 두께방향으로 마이너스 (-) 부호를 나타내고 있다. Fig. 8에서 변형값이 마이너스 부호를 갖는 이유는 Fig. 9에서 나타낸 것과 같이 열처리 후 시험편의 표면에서 압축응력이 발생하는 원인으로 판단하였다. 또한 Fig. 9는 열처리 후 시험편의 두께 방향의 Mean Stress에 대해 시험편 폭 방향의 전단면(section)을 나타낸 것으로 열처리 후 시험편의 두께방향으로 응력 분포를 확인하기 위함이며, 이를 통하여 열처리 후 잔류응력의 특성을 분석하였다. 그림에서 보는 것과 같이 열처리 후 시험편의 표면에서 404 MPa의 압축응력이 작용하고 있고 열처리 표면 아래 부분에서는 표면의 압축응력에 상응하는 인장응력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 이때 최대 인장응력은 433 MPa로 확인되었으며, 이는 잔류응력으로 분포될 것으로 판단된다. 또한 열처리 후 표면의 압축응력과 내부 인장응력에 의해 열처리 변형을 유발하고 있으며, 특히 표면의

압축응력은 열처리 전·후 변형 특징으로 비틀림이 없을 경우 변형의 값은 마이너스(-) 부호로 나타난다. 그리고 열처리 후 응력분포는 입열량의 증가와 함께 응력이 증가함으로 변형량을 줄이기 위해서는 응력량을 줄이는 것이 필요하다. 이는 레이저 열처리 시 표면용융없이 경화되는 범위내에서 입열량을 줄여야 하기 때문에 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도를 이용하여 최소 입열량이 되도록 열처리 조건 설정을 하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 상용유한요소해석 프로그램인 SYSWELD를 이용하여 다이오드 레이저 열원을 모델링한 후 HP4MA 금형소재의 열처리에 관한 시뮬레이션을 하였고, 해석을 통해 열처리 조건을 예측하고자 하였다. 또한 실험적으로 비교 검증함으로써 해석적 방법을 통한 적정 열처리조건 설정의 타당성을 검토 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 레이저 열처리에서 주요 지배인자인 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도가 같은 조건에서의 실험 및 해석결과의 경화특성을 비교 검토하였다. 열처리 온도 1,050°C, 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec에서 해석의 경우 표면경도 728 Hv, 경화폭 34.7 mm, 경화 깊이 1.87 mm로 나타났고, 실험의 경우 700 Hv, 28.7 mm, 0.91 mm로 나타나 표면경도값은 비슷하였으나, 경화폭 및 경화깊이는 차이가 있음을 확인하였다. 이는 해석에 사용된 레이저 열원의 경우 빔의 형상 및 에너지 손실이 실험의 경우보다 적어 나타난 결과로 판단된다.

2. 레이저 열처리시 시험편의 응력분포의 경우 열처리 표면에서는 큰 압축응력이 작용하고 이 압축응력에 의해 표면 아래에서는 인장응력이 작용하고 있

는 것을 확인하였다. 따라서 이와 같은 응력이 잔류 응력으로 분포되면, 이 응력에 의해 변형의 모드가 결정될 것으로 판단된다.

3. 열처리 온도 1,050°C, 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec에서의 해석 및 실험의 표면에서의 변형 모드는 마이너스부호를 가졌다. 이는 레이저 열처리 후 표면의 압축응력에 따른 것으로 판단된다. 또한 해석 및 실험에서의 최대 변형량은 각각 1.4 μm와 2.8 μm로 나타나 변형의 값은 차이가 있으나 변형 모드는 비슷하게 유지하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 산업핵심기술개발사업의 연구기금 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. D. Kim : Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding, KSME J, 4(1) (1990) 32-39.
2. Sindo Kou, et al., : A Fundamental Study of Laser Transformation Hardening, Metall. Trans., **14A** (1983) 643-653.
3. M. F. Ashby, et al., : The Prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening, Metall. Trans., **22A** (1991) 2459-2466.
4. J. D. Kim : The Laser Hardening Characteristics of the Alloy Tool Steels STD11, KSHT J, **6**(4) (1993) 230-236.
5. L. J. Segerlind : Applied Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, 1976.
6. D. W. Pepper and J. C. Heinrich : The Finite Element Method, Hemisphere Publishing, (1992).
7. G. W. Krutz and L. J. Segerlind : Finite Element Analysis of Welded Structures, Welding J., Research Suppl., July. (1978) 211s-216s.