

다이오드 레이저를 이용한 SM45C 환봉 표면경화 열처리의 유한요소해석

조해용[†] · 김관우* · 이제훈** · 서정** · 김종도***

Finite element analysis for surface hardening of SM45C round bar by diode laser

Hae Yong Cho[†], Kwan Woo Kim*, Jae Hoon Lee**, Jeong Suh** and Jong Do Kim***

Key Words: FEM(유한요소법), Laser(레이저), Surface hardening(표면경화), Heat source(열원), Heat treatment(열처리)

Abstract

Surface heat treatment of SM45C round bar by diode laser was simulated to find it's condition by using commercial finite element code MARC. Due to axisymmetric geometry, a quarter of model for SM45C round bar was considered and user subroutines were applied to boundary condition for the heat transfer. Material properties such as conductivity, specific heat and mass density were given as a function of temperature. Rotation speed of round bar and feed rate of beam were considered to design heat source model. Shape parameter values of heat source were determined by beam profile. As results, Three dimensional heat source model for diode laser beam conditions of surface hardening has been designed by the comparison between the finite element analysis results and experimental data on SM45C round bar. Diode laser surface hardening for SM45C round bar was successfully simulated and it should be useful to determine optimal heat treatment condition.

1. 서론

표면경화 열처리는 부품의 표면경도를 높이는 방법으로 내마모성의 증가는 물론 외부의 발생 열이나 하중에 대해 견딜 수 있도록 기계적 성질을 개선시킬 수 있다. 이에 대한 레이저 적용은 물리적, 화학적 경화방법에 비해 특정 범위만을 효율적으로 경화시킬 수 있고 비접촉 가공으로

자동화를 위한 자유도가 높으며 고밀도에너지로의 정밀가공으로 열영향부를 최소화시킬 수 있을 뿐만 아니라 가공속도가 빠름으로 생산성을 향상시킬 수 있다. 그 중 다이오드 레이저는 기존 가우시안 빔 프로파일을 갖는 CO₂, Nd:YAG 레이저와 달리 조사범위에 거의 균등한 에너지밀도로 표면을 가열할 수 있고, 빔의 반사율이 작기 때문에 표면경화 열처리에 보다 적합하다.

레이저 표면경화 열처리의 공정변수로는 레이저 종류, 빔의 파워, 형태, 속도, 직경 등이 있고 가공 재료 및 형태 등에 따른 적정 조건 설정이 필요하다. 따라서 이를 위한 실험이나 해석을 통해 관련연구들이 활발히 진행되고 있다. 주로 많이 사용되는 탄소강, 합금강 등에 대해 CO₂, Nd:YAG 레이저를 이용한 경화실험과 조건별 열

[†] 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : hycho@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2464 FAX : (043)263-2448

* 충북대학교 대학원

** 한국기계연구원 정보장비연구센터

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부

처리 범위, 조직변화, 경도 등의 관찰 및 측정분석을 통한 많은 실험연구¹⁻³⁾와 해석을 통한 열처리 범위, 잔류응력 등의 예측과 실험검증을 내용으로 하는 연구⁴⁾ 등이 진행되어 왔다. 그리고 최근 고출력 다이오드 레이저의 개발로 그 적용범위가 확대되고 있으며 이를 이용한 합금강 표면경화 열처리에 대해 실험적, 해석적 연구들⁵⁻⁷⁾이 진행되고 있지만 다양한 재질에 대해서 적정 열처리 조건설정에 필요한 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 다이오드 레이저를 이용한 SM45C 환봉의 표면경화 열처리에 관한 시뮬레이션을 하였고, 그 결과를 동일조건에서의 실험과 비교분석하였다. 입열조건으로 다이오드 레이저 빔 프로파일을 이용하여 2차원 이동 열원모형을 설계하여 열 해석에 적용시켰고, 환봉의 회전속도와 빔 이송속도 변화에 따른 해석결과를 통하여 표면경화 범위 및 조건에 따른 표면용융 여부를 예측하였으며, 이를 실험적으로 비교·검증함으로써 해석적 방법을 통한 적정 열처리조건 설정의 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 해석 방법

상용유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 SM45C 환봉의 다이오드 레이저 표면경화 열처리에 관한 시뮬레이션 하였으며 전체적인 해석과정은 Fig. 1과 같다.

전처리 과정에서는 열전달 해석을 위한 환봉

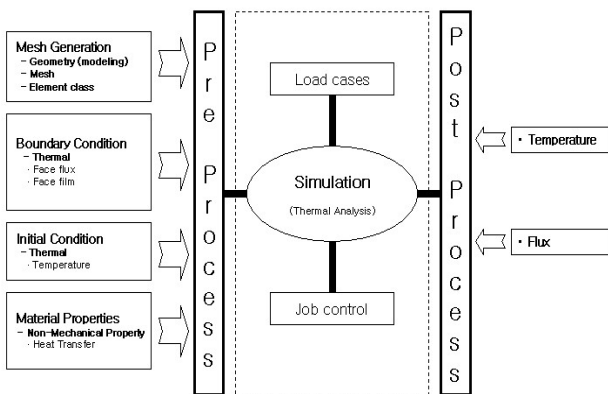


Fig. 1 The procedure of analysis

모델의 요소분할, 이동형 2차원 열원에 의한 입열과 대류 및 복사의 열적 경계조건 설정, 용접 전 재료의 초기온도 설정, 재료의 열적물성들이 입력된다.

해석과정으로 우선 열처리 시뮬레이션과 동일 조건 실험시편의 열처리부 단면크기를 비교분석함으로써 열원의 에너지밀도(Q_0) 값을 결정하고 빔 프로파일을 이용한 열원형상변수 값을 적용하여 이동형 2차원 다이오드 레이저 빔 열원을 설계하였다. 다음으로 설계된 열원을 해석에 적용시켜 소재 회전속도와 빔 이송속도 변화에 열처리 소재의 온도분포를 예측하고, 동일조건에서의 실험시편과 비교분석하여 예측된 결과를 검증하였다.

2.1 표면경화 열처리 실험 및 해석 모델

독일 Laserline사의 1kW급 다이오드 레이저를 사용하여 Fig. 2에서와 같이 직경 24mm, 길이 250mm의 SM45C 환봉을 척에 물리고 약 25mm

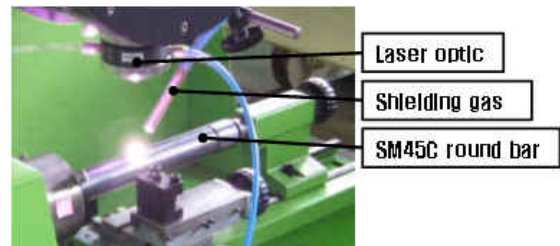


Fig. 2 Experiment system for diode laser irradiation on SM45C round bar

Table 1 Experimental conditions for diode laser heat treatment of SM45C round bar

Workpiece	Diode Laser beam		
	RPM (rev/min)	Feed (mm/min)	diameter (mm)
18	36, 40 44	3	1
20	36, 40 44		
22	36, 40 44		
24	36, 40 44		
26	36, 40 44		
Shielding gas(Ar)			
Inner dia. of nozzle(mm)	Angle of jet	Vol. of flowing for min. (l/min)	
3	45°	30	

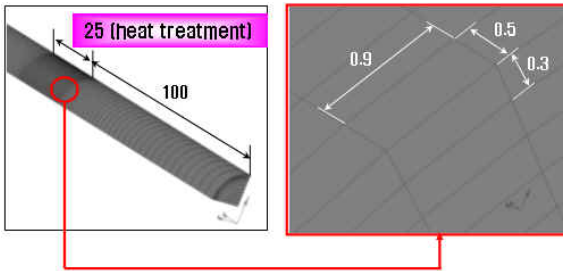


Fig. 3 A quarter of Model of SM45C round bar

구간을 다이오드 레이저 표면 열처리하였으며 실험조건은 Table 1과 같다. 초점거리 200mm에서 빔 조사 직경이 3mm인 광학계를 사용하였고 소재 회전속도 및 빔 이송속도를 변화시키며 실험하였다. 24rpm, 40mm/min로 열처리된 시편을 이용하여 열원 모델링하였다. 실험 후 시편절단, 폴리싱, 에칭, 이미지 애널리저를 통한 치수측정을 하여 열처리 범위 및 크기를 측정하였고 해석결과와 비교분석하였다.

Fig. 3은 해석모델과 열처리 구간을 나타낸 것으로 빔 조사범위는 급격한 온도변화를 겪을 뿐만 아니라 2차원 다이오드 레이저 표면열원을 통한 입열 경계조건의 정확한 적용을 위해 조밀한 요소분할을 하였다. 그리고 소재가 축대칭임을 고려하여 1/4모델링 하였으며 해석모델의 크기는 열처리시편의 크기와 동일하다.

2.2 2차원 다이오드 레이저 이동열원 모델

Fig. 4는 초점거리 200mm에서 빔 조사 직경이 3mm인 광학계를 통과한 출력 1kW 다이오드 레이저 빔의 프로파일을 나타낸 것이다. 그림에서 입열 중심부 에너지 밀도가 주위보다 약간 큼을 볼 수 있고 이상적인 다이오드 레이저의 빔 프로파일과 약간 차이가 남을 알 수 있다.

Fig. 5 (a)는 빔 프로파일이 적용된 2차원 표면 열원 모델의 형상변수(L1, L2, Rh) 및 단위면적당 에너지밀도(Q0, Q1)를 나타낸 것이다. 빔 조사 직경 3mm범위 안의 각 지점별 단위 면적당 입열량은 Q0와 Q1, 형상변수인 L1, L2를 이용하여 기하학적으로 계산 된다. Fig. 4의 우측 빔 프로파일 그림에서 Dh 및 L1과 L2 길이를 측정할 수 있고 측정된 Dh 값은 빔 직경 3mm에 해당하므로 비례식을 사용하여 Fig. 5 (a)의 L1과 L2값을 환산할 수 있다. 이렇게 하여 빔 형상변수 L1, L2값을 0.52, 0.12로 결정 할 수 있다. 그러면 Q1은

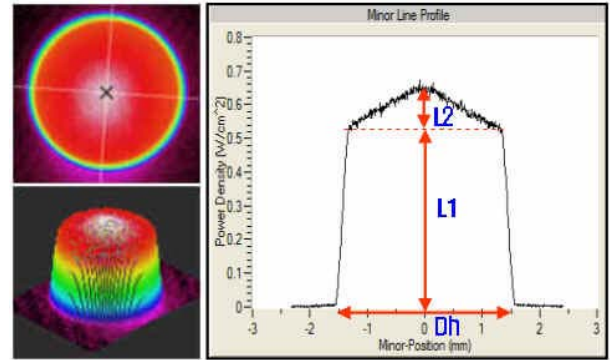
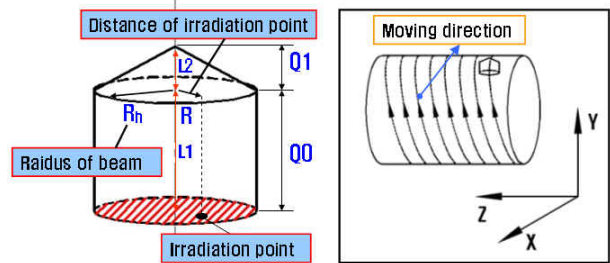


Fig. 4 Beam profile of diode laser using optics



(a) shape & parameter (b) trajectory

Fig. 5 Assumed Moving heat source

다음 식으로 표현될 수 있다.

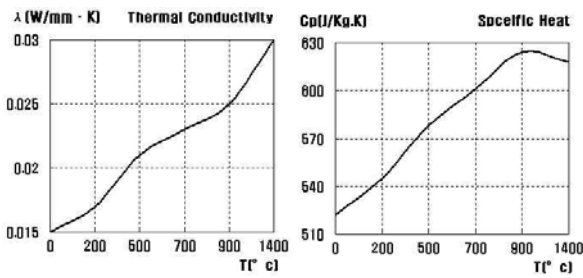
$$Q1 = Q0 \times (L2/L1)$$

임의 입열 지점에서의 단위 면적당 입열량은 다음 식으로 계산된다. 여기서, Rh는 빔 조사 반경 $Q = Q0 + (Rh - R) \times (Q1/Rh)$ 값이고 R은 열원 중심으로부터 입열 지점까지의 거리이다. 따라서 Fig. 5 (a)의 단위면적당 입열량 Q0값을 결정하면 열원모델 설계가 완료된다. Q0 값은 해석과 기준 실험시편의 열처리 범위 및 크기비교를 통해 결정될 수 있다. 본 연구에서는 Table 1의 실험조건 중 24rpm, 40mm/min인 열처리 시편을 기준으로 하였고 동일조건 해석결과와의 비교에서 그 크기와 범위가 일치되는 조건의 Q0값은 36.7W/mm²였다.

Fig. 5 (b)는 소재의 회전 및 빔의 이송속도를 고려하여 설계된 열원이 회전 이동하는 경로를 나타낸 것이다. 이와 같은 2차원 이동 표면열원과 열처리 경로를 입열 경계조건으로 적용시키기 위하여 서브프로그램을 작성하였다. 이렇게 설계된 열원을 이용하여 Table 2와 같이 회전속도 및 이송속도 변화에 따른 열 해석을 하고 동일조건으로의 열처리 시편과 비교분석하여 열원모델의 적합성을 검증하였다.

Table 2 Application of material properties

Thermal property	Value
Conductivity(W/(mm·K))	Temperature dependent
Specific heat(J/(kg·K))	Temperature dependent
Mass density(kg/mm ³)	7.85×10^{-6} (constant)



(a) conductivity (b) specific heat

Fig. 6 Thermal properties of SM45C

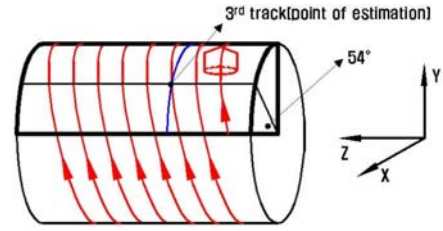
2.3 경계조건 및 물성치

열전달 해석의 경계조건은 다이오드 레이저빔에 의한 입열조건과 재료의 냉각조건으로 나누어 볼 수 있다. 소재 회전속도 빔 이송속도에 따른 입열조건을 변화시키며 시뮬레이션 할 수 있는 서브프로그램을 작성하여 해석에 적용시켰다. 그리고 냉각조건으로 복사에 의한 열전달과 상운의 공기와 가열된 열처리재료 사이의 대류 열전달이 고려된 서브프로그램을 작성하였다. 특히 대류에 대한 열전달 계수는 소재의 직경과 회전속도에 따라 달라지며 표면에서의 공기마찰 속도에 따른 값을 열전달 이론을 통해 계산하였다.

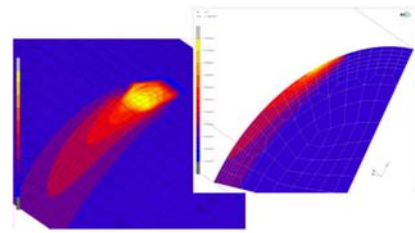
고밀도 에너지를 이용한 다이오드 레이저 표면 경화에서 열처리되는 표면부는 순간적으로 가열되어 온도가 급상승했다가 국부가열 후에는 급속도로 냉각된다. 이렇게 큰 온도변화를 겪는 재료의 열적 물성은 온도에 따라 큰 차이를 나타내며, 열 해석을 위해서는 온도에 따른 데이터로 적용되어야만 한다. Table 2와 Fig. 6은 해석에 적용된 방법과 물성치를 나타낸 것이다.

3. 해석결과 및 고찰

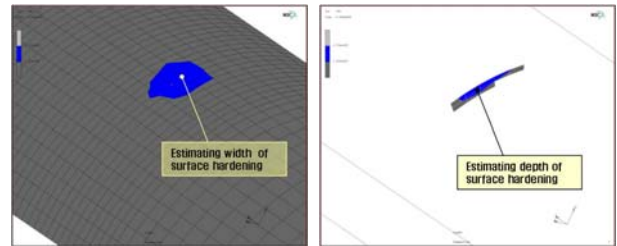
Fig. 7 (a)는 동일조건 실험과의 열처리 범위비교를 위한 열 해석결과의 데이터 취득 위치를 나타낸 것으로 열처리 시작점에서 54°에 위치한 3



(a) point of estimation



(b) distribution of temperature



(c) surface

(d) cross section

Fig. 7 Result of thermal analysis and estimation of dimensions of heat treatment

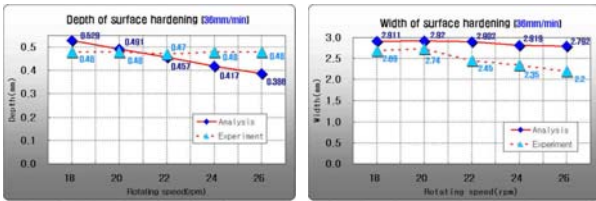
번째 트랙위치의 해석결과를 실험시편과 비교분석하였다.

Fig. 7 (b)는 열처리 과정 중 표면부 및 단면의 온도분포를 나타낸다. 열처리 범위 및 용융여부 판단기준으로 급격한 온도 상승률에 대한 변태온도를 830°C, 용융온도 1450°C를 고려하였다.

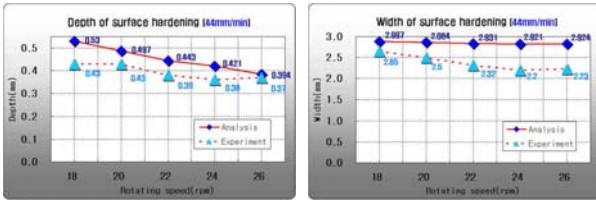
Fig. 7 (c)는 변태온도(830°C), 용융온도(1450°C)를 기준으로 온도분포를 나타낸 것으로 표면 열처리 및 용융발생 범위와 크기를 알 수 있으며 표면부 열처리 범위를 이용하여 경화 폭을 예측할 수 있다.

Fig. 7 (d)는 단면에서의 열처리 범위를 나타낸 것으로 경화 깊이를 예측할 수 있다.

Fig. 8은 각 이송속도별 환봉 회전속도에 따른 열처리 깊이와 폭을 나타낸 것이다. 해석과 실험치의 비교오차 범위는 2~24%로 비교적 잘 일치하였다. Fig. 8 (a), (b)를 보면 회전속도 변화에 대한 열처리 폭 변화는 깊이에 비해 작을 것으로



(a) 36mm/min

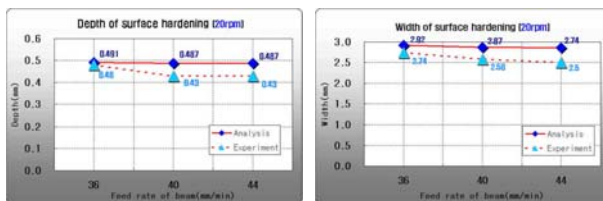


(b) 44mm/min

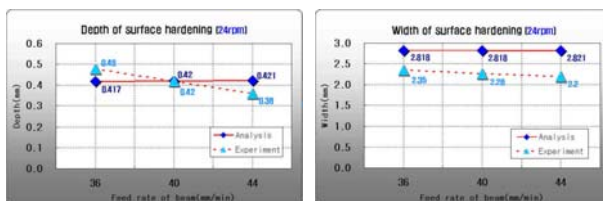
Fig. 8 Comparison of hardening depth and width per various feed rate

예측되었고 그 경향은 실험과도 잘 일치하였다. 같은 이송속도에서 회전속도가 느릴수록 열처리 깊이는 커지지만 열처리부의 중첩도, 용융발생 등을 고려하여 빔 이송속도에 대한 적정 회전수 설정이 필요할 것으로 생각되며 표면 용융여부의 결과는 실험과 약간의 차이가 있었고 일관성이 떨어졌는데 추후 연구에서 재 실험을 통한 비교 분석이 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 9는 각 회전속도별 이송속도에 따른 열처리 깊이와 폭을 나타낸 것으로 36~44mm/min의 이송속도의 변화는 열처리 범위변화에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 예측되었고 이는 실험결

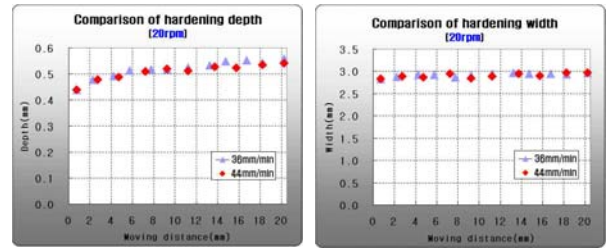


(a) 20rpm

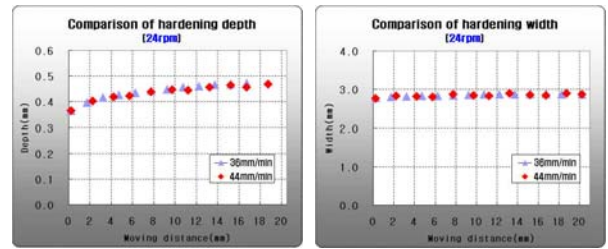


(b) 24rpm

Fig. 9 Comparison of hardening depth and width per various rotating speed



(a) 20rpm



(b) 24rpm

Fig. 10 Hardening depth and width during heat treatment per various rotating speed

과와도 잘 부합되었다. 따라서 SM45C 다이오드 레이저 열처리조건 설정에 있어 경화범위는 회전속도의 영향이 크므로 적정 회전수의 결정이 선행되어야하고 중첩도 조절을 위한 이송속도 설정이 필요할 것으로 생각된다. 해석과 실험을 통한 검증에서 다이오드 레이저의 빔 프로파일과 기준 열처리 시편을 이용한 해석적 연구방법으로 다양한 소재의 열처리에 대한 광학계 별 열원 모델링이 가능할 것으로 생각되고, 열처리 범위 및 온도분포를 예측 할 수 있기 때문에 레이저 복합가공기의 열처리 가공조건 설정에 있어 비용 및 시간 절감의 효과를 줄 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10은 각 회전속도별 빔 이동거리에 따른 열처리 범위를 나타낸 것으로 36, 44mm/min의 이송속도에 대해 깊이 및 폭 값의 차이가 거의 없음을 알 수 있고 열처리 시작 시점부터 폭 변화는 거의 없으며 열처리 깊이의 경우 빔 이동거리 약 14mm부터 일정 깊이로의 열처리가 가능할 것으로 생각된다.

Table 3은 열처리 조건별 해석과 실험값을 정리하여 나타낸 것이다. 표면 열처리 깊이는 26rpm에서 최소 약 0.38mm, 18rpm에서 최대 약 0.53mm 정도 일 것으로 예측되었으며 실험과 비교적 잘 일치하였다. 따라서 추가실험을 통한 열원모델 수정으로 보다 정확한 열처리 조건 예측 및 설정이 가능할 것으로 생각된다.

Table 3 Results of analysis and experiment for surface hardening of SM45C

RPM (rev/min)	Feed (mm/min)	Hardening depth (mm)		Hardening width (mm)	
		analysis	experiment	analysis	experiment
18	36	0.529	0.48	2.911	2.69
	40	0.529	0.45	2.907	2.65
	44	0.53	0.43	2.887	2.65
20	36	0.491	0.48	2.92	2.74
	40	0.487	0.43	2.871	2.58
	44	0.487	0.43	2.864	2.5
22	36	0.456	0.47	2.902	2.45
	40	0.457	0.4	2.886	2.38
	44	0.443	0.38	2.831	2.32
24	36	0.417	0.48	2.818	2.35
	40	0.42	0.42	2.818	2.26
	44	0.421	0.36	2.821	2.2
26	36	0.386	0.48	2.792	2.2
	40	0.375	0.39	2.782	2.23
	44	0.384	0.37	2.824	2.23

4. 결 론

상용 유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 SM45C 환봉의 다이오드 레이저 표면경화 열처리에 관한 열 해석을 하였고 동일조건 실험시편과 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면경화 열처리 가공조건 변수에서 빔 이송속도 보다는 소재 회전속도의 영향이 큼을 알 수 있었다. 따라서 회전속도와 적정 열처리 중첩 정도에 따른 이송속도 결정이 필요할 것으로 생각된다.

(2) SM45C 환봉 표면 열처리 깊이, 폭을 약 2~24%의 오차범위 내에서 예측할 수 있었고 표면 열처리 깊이는 26rpm에서 최소 0.38mm, 18rpm에서 최대 0.53mm 정도 일 것으로 예측되었으며 실험과 비교적 잘 일치하였다. 따라서 추가실험을 통한 열원모델 수정으로 보다 정확한 열처리 조건 예측 및 설정이 가능할 것이다.

(3) 다양한 소재의 열처리에 대한 광학계 별 열원 모델링이 가능할 것으로 생각되고, 열처리 범위 및 온도분포를 예측 할 수 있는 해석적 방법은 복합가공기의 용접 및 열처리 등의 가공조건 설정에 있어 비용 및 시간 절감의 효과를 줄 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원사업인 산업기술 개발 사업의 “레이저 복합가공기 개발” 과제의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- (1) Katsamas, A. I. and Haidemenopoulos, G. N., 1999, "Surface hardening of low-alloy 15CrNi6 steel by CO₂ laser beam," *Surface and Coatings Technology*. Vol. 115, Issues 2-3, pp. 249~255.
- (2) Ganeev, R. A., 2002, "Low-power laser hardening of steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, Issues 2-3, pp. 414~419.
- (3) Na, G. D., Yoo Y. T., Shin, H. J. and Shin, B. H., 2006, "Characteristics Induction and Laser Surface hardening of SM45C Steel," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 39~43.
- (4) Kim, J. D. and Maeng, J. W., 1999, "Residual stress Analysis for Wide-band Heat Treatment Using Finite Element Method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 68~73.
- (5) Pansar, H. and Kujanpaa, V., 2006, "Effect of oxide layer growth on diode laser beam transformation hardening of steels," *Surface and Coatings Technology*. Vol. 200, Issues 8, pp. 2627~2633.
- (6) Pashby, I. R., Barnes, S. and Bryden, B. G., 2003, "Surface hardening of steel using a high power diode laser," *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 139, Issues 1-3, pp. 585~588.
- (7) Skvarenina, S. and Shin, Y. C., 2006, "Predictive modeling and experimental results for laser hardening of AISI 1536 steel with complex geometric features by a high power diode laser," *Surface and Coatings Technology*. Vol. 201, Issues 6, pp. 2256~2269.