

# 다이오드 레이저를 이용한 열간 단조 금형의 표면경화처리 기술개발

## Surface Hardening of Hot Forging Die Using Diode Laser

현대자동차 생산기술개발팀  
이희범, 장인성, 정대현, 김기순

### 1. 서론

레이저 표면경화처리(Laser surface hardening treatment) 부품표면을 국부적으로 단시간에 고 열원의 레이저빔을 조사시켜 용점 직하까지 가열하여 소재를 오스테나이트 조직으로 만들고 이 조직은 소재자체의 열전도 및 공냉에 의해 자기냉각 (self-quenching) 되어 고 경도의 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있다. 그리하여, 기존의 표면경화처리보다 표면층의 경화효과를 최대화 할 수 있으며 후처리 공정이 필요 없어 부품을 생산, 가공한 후 레이저 열처리 공정을 거쳐 신속하게 사용할 수 있다. 따라서, 고응력이 걸리는 부품의 표면에 국부적으로 적용되며 표면경도, 내마모성 및 내피로성 등을 향상시키면서 경화되지 않은 모재층에는 연성이 유지되기 때문에 자동차 부품을 비롯하여 항공기부품, 일반기계부품 등의 표면경화처리에 급속적인 연구개발과 보급이 확산되며 실용화되고 있다.

레이저 표면경화처리 결과는 가공물의 표면에 조사되는 레이저 흡수량에 따라 변화할 수 있으며 레이저 흡수량은 레이저에너지의 흡수율, 출력밀도(Intensity), 레이저조사속도에 따라 달라진다. 레이저 흡수율은 레이저파장(레이저종류)에 따라 크게 달라지는데 최근 개발된 다이오드레이저는 Fig. 1과 같이 기존의 Nd:YAG레이저나 CO<sub>2</sub>레이저에 비해 흡수율이 높기 때문에 동일한 출력으로 열처리 하더라도 깊은 경화면을 얻을 수 있어 레이저 열처리 분야에서 사용이 증가하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 다이오드 레이저를 이용하여 자동차 엔진 부품인 크랭크샤프트의 성형에 사용되는 열간단조금형소재(SKD61)의 표면에 출력밀도 및 조사속도를 달리하여 표면경화처리를 하였으며 경화처리부의 경도 및 경화깊이 등의 특성을 고찰하였다. 또한, 동일한 출력밀도 및 조사속도로 Nd:YAG레이저를 이용하여 표면경화처리를 수행하고 비교 고찰하였다. 이때, 열처리에 사용된 열간단조금형소재(SKD61)의 화학성분은 Table. 1에 나타내었다.

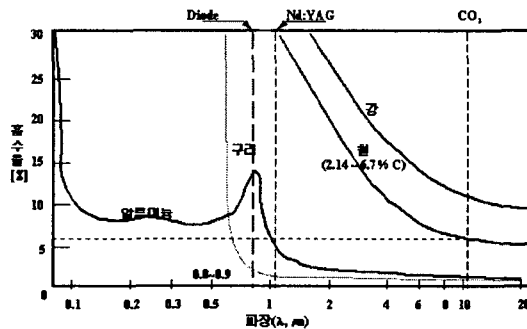


Fig. 1 레이저발전장치에 따른 흡수율 비교

화학성분	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	V
wt%	0.32~0.42	0.8~1.2	0.50이하	0.030이하	4.5~5.5	1.0~1.5	0.8~1.2

Table. 1 열간단조금형(SKD61)의 화학성분

## II. 실험방법

본 실험에서 사용한 레이저는 Rofin-Sinar社의 2.5kW 고출력 다이오드레이저로서 레이저파장은 808nm 및 940nm이며 사각형의 레이저빔이며 국내최초로 사용되었다. 실험에 사용된 레이저 조사속도는 30~50mm/sec이며 출력밀도는 30~80W/mm<sup>2</sup>로 설정하여 각각의 시편에 표면경화처리 하였다. 또한, 레이저 흡수율에 따라 변화하는 표면경화 특성을 비교하기 위하여 HAAS社 4.0kW Nd:YAG 레이저 발전장치를 이용하여 표면경화처리 하였으며 이에 사용된 실험조건은 Table. 2에 나타내었다.

구분	Diode Laser	Nd:YAG Laser
Focal Length(mm)	165	45
Spot Size(mm)	4.3(L)×4.5(W)	11(L)×3.9(W)
Intensity(W/mm <sup>2</sup> )	30~80	
조사속도(mm/sec)	30~50	

Table. 2 열간단조금형의 표면경화처리 시험조건

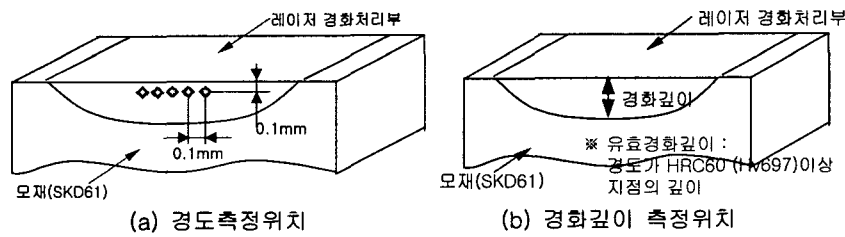


Fig. 2 표면경화처리부 경도 및 경화깊이 측정위치

표면경화처리된 시험편은 단면을 절단하고 정마하여 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 200g의 하중으로 경화부의 경도를 측정하였으며 Fig. 2과 같은 방법으로 경도 및 유효경화깊이를 측정하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 단면경도측정 결과

Fig. 3에 레이저 조사속도 30mm/sec에서 다이오드레이저와 Nd:YAG 레이저 표면경화처리부 단면의 경도를 나타내었다.

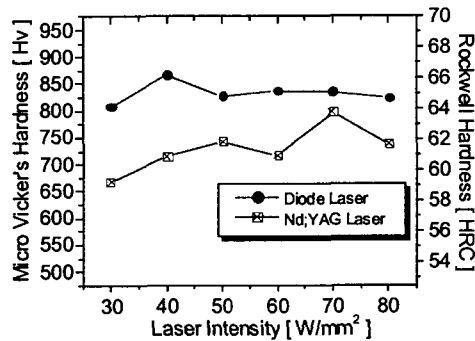


Fig. 3 에너지 밀도에 따른 단면경도변화 [조사속도:30mm/sec]

그림에서 동일한 조사속도에서 출력밀도의 증가에 따라 다이오드레이저와 Nd:YAG레이저의 경도를 비교한 결과 다이오드레이저로 경화처리한 시험편의 경도가 Nd:YAG레이저보다 평균 HRc 3.9(Hv 100.86) 높게 나타났다. 이것은 다이오드레이저가 Nd:YAG레이저보다 파장이 짧아 레이저 흡수율이 높기 때문에 소재표면에 레이저 흡수량이 높아져 경화도가 높아짐에 따라 나타나는 현상으로 판단되며 다이오드 레이저를 사용할 경우 금형 표면에 레이저에너지 흡수율을 높이기 위한 흡수제를 도포하지 않아도 만족할 만한 경도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 경도가 높음으로 인하여 금형의 마모속도를 감소시켜 금형의 수명을 연장시킬 수 있을 것이다.

## 2. 경화 깊이 및 유효경화깊이 비교

Fig. 4과 5에 동일한 레이저 조사속도에서의 경화깊이 및 유효경화깊이를 나타내었다. Fig. 4에서 경화깊이는 출력밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내며 경화깊이는 Nd:YAG레이저가 더 높지만 Nd:YAG레이저의 경우 출력밀도  $40\text{W}/\text{mm}^2$  이상의 경우 재용융(Remelting)이 발생하기 때문에 재용융이 발생하지 않는 조건인  $30\text{W}/\text{mm}^2$ 의 조건에서 경화깊이는  $0.3\text{mm}$ 로 깊지 않다. 반면에 다이오드레이저의 경우 동일레이저 조사속도에서  $60\text{W}/\text{mm}^2$ 의 출력밀도에서 재용융이 발생하기 시작하며  $50\text{W}/\text{mm}^2$ 의 조건에서 경화깊이가  $0.5\text{mm}$ 로서 Nd:YAG레이저 보다  $0.2\text{mm}$  높게 나타난다. Fig. 5에 유효경화깊이를 나타내었는데 본 연구에서는 유효경화깊이를 열간단조금형의 레이저 표면경화처리를 수행하였을 때 목표경도인 HRc60이상의 경도치를 나타내는 지점까지의 깊이로 정의하였다. 그림에서 재용융이전의 표면경화조건의 출력밀도에서 유효경화깊이를 비교하였을 때 다이오드레이저는 유효경화깊이가  $0.4\text{mm}$ 이며 Nd:YAG레이저는 유효경화영역이 거의 나타나지 않는다.

크랭크샤프트 열간단조금형의 경우 소재의 온도가  $1250^\circ\text{C}$ 로 매우 높고 단조가압에 의해 소재가 유동할 때 소재와의 마찰때문에 금형의 마모가 크게 발생하는 조건이기 때문에 레이저 경화처리부의 유효경화깊이는 매우 중요하다. 따라서, 다이오드레이저의 경화깊이 및 유효경화깊이가 Nd:YAG레이저 보다 높기 때문에 표면경화처리의 효율을 높일 수 있으며 다이오드레이저로 양산금형에 열처리 할 경우 만족할만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

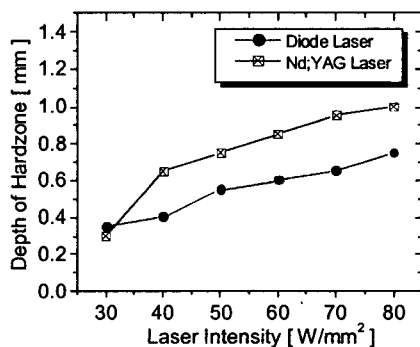


Fig. 4 출력밀도에 따른 경화 깊이 변화  
[레이저 조사속도 :  $30\text{mm}/\text{sec}$ ]

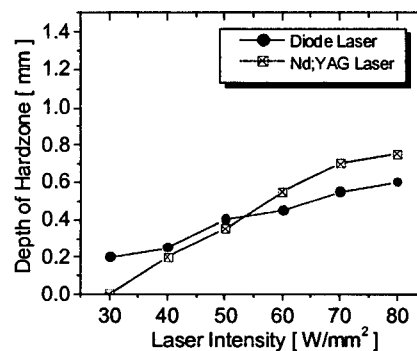


Fig. 5 출력밀도에 따른 유효경화 깊이 변화  
[레이저 조사속도 :  $30\text{mm}/\text{sec}$ ]

## 3. 경도특성 비교

경도 및 경화깊이를 고려하여 다이오드레이저 및 Nd:YAG레이저를 이용한 열간단조 금형소재에 대한 표면경화처리 최적조건을 설정하였으며 그 결과를 Table. 3에 나타내었다.

구분	Diode Laser	Nd:YAG Laser
레이저조사속도 (mm/sec)	30	50
에너지 밀도 (W/mm <sup>2</sup> )	50	50

Table. 3 레이저 표면경화처리를 위한 최적조건

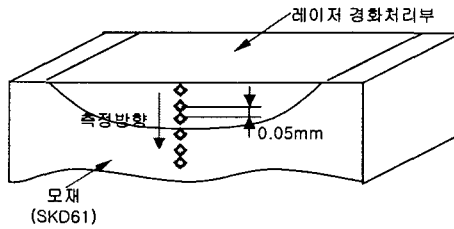


Fig. 6 경도측정 방법

위의 조건으로 Fig. 6와 같은 방법으로 마르텐사이트 조직으로 변태한 경화층의 경도변화를 측정한 결과를 Fig. 7 과 8에 나타내었다.

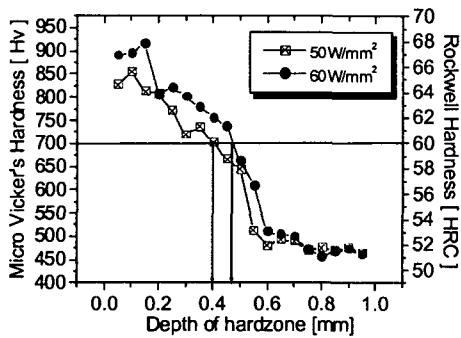


Fig. 7 깊이에 따른 경도 변화  
[다이오드 레이저 조사속도: 30mm/sec]

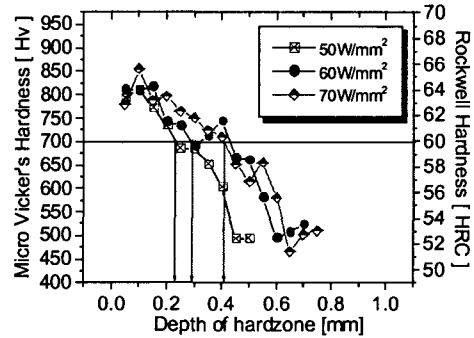


Fig. 8 깊이에 따른 경도 변화  
[Nd:YAG 레이저 조사속도: 50mm/sec]

Fig. 7은 다이오드레이저의 경화깊이별 단면경도 변화곡선을 나타내었는데 표면부는 레이저 열원에 의한 급열 및 급냉에 의해 높은 경도가 형성되었으나 경화처리 되지 않은 부분의 경도는 Hrc52(Hv500)정도로서 표면층의 레이저 경화부에 비해 현저히 낮다. 출력밀도에 따른 경화깊이를 비교하면 에너지밀도 50W/mm<sup>2</sup>보다 60W/mm<sup>2</sup>이 경도 및 경화깊이의 측면에서 더 양호하게 나타나지만 60W/mm<sup>2</sup>의 경우는 재용융이 발생하기 때문에 실제 양산시에는 재용융된 표면에서 크랙이 발생할 수 있어 적합한 열처리 조건이라 할 수 없다. 따라서, 최적조건은 출력밀도 50W/mm<sup>2</sup>이며 이때 유효경화깊이는 0.4mm이다.

Fig. 8은 Nd:YAG레이저의 경화깊이별 단면경도 변화곡선을 나타내었다. 레이저 조사속도 50mm/sec에서 출력밀도를 50~70W/mm<sup>2</sup>으로 변화시켜 깊이별로 경도변화를 측정하여 나타내었다. Nd:YAG레이저도 다이오드레이저와 마찬가지로 표면층의 경화면은 경화되지 않은 부분에 비해 경도가 매우 높으며 출력밀도가 높아질수록 경도 및 경화깊이의 면에서 양호하다 그러나, 출력밀도 60W/mm<sup>2</sup>부터는 재용융이 발생하기 때문에 양산조건으로는 부적합할 것으로 판단된다. 최적조건에서의 유효경화깊이는 0.25mm로서 다이오드레이저의 최적조건에서의 유효경화깊이보다 낮게 나타난다.

Fig. 7과 8에서 다이오드레이저 및 Nd:YAG레이저에 대한 최적 표면처리조건에서의 경도 변화특성을 비교하면 다이오드레이저의 경우 Nd:YAG레이저보다 경화부에서 비 경화부로 인접할 때 경도가 더 급격하게 감소함을 알 수 있다. 이것은 레이저 흡수율차이에 의해 나타나

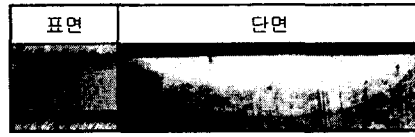


Fig. 9 표면경화처리부 표면 및 단면형상

- 레이저종류 : 다이오드레이저
- 조사속도 : 30mm/sec, 출력밀도 : 50W/mm<sup>2</sup>

는 현상으로 판단되며 다이오드레이저의 경우 Nd:YAG레이저보다 흡수율이 높기 때문에 레이저빔에서 모재쪽으로 에너지가 전달될 때 에너지손실이 작아 경화부가 깊게 나타나며 경화부와 비 경화부 사이의 경도차이 또한 큰 것으로 판단된다.

Fig. 9에 표면경화처리 최적조건에서의 표면 및 단면형상을 나타내었다. 경화처리부 표면은 산화막 등이 형성되지 않고 미려하였으며 단면은 경화 처리부와 비 경화 처리부의 경계가 뚜렷하다.

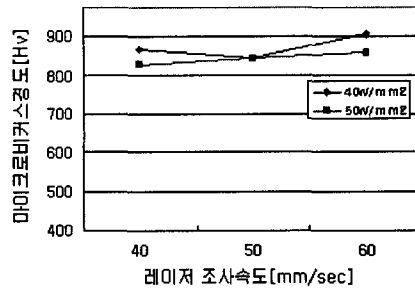


Fig. 10 레이저 조사속도에 따른 경도변화 [다이오드레이저]

Fig. 10에 다이오드레이저 조사속도에 따른 경도변화를 나타내었는데 조사속도가 빨라짐에 따라 경화깊이는 줄어들었으나 경도에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

#### IV. 결론

1. 다이오드레이저를 이용하여 열간단조금형의 표면경화처리를 수행한 결과 마르텐사이트 조직으로 변태한 경화부와 비 경화부 사이의 경도차이가 크게 발생하여 표면경화효과가 매우 큼을 알 수 있었다.
2. 다이오드레이저 표면경화처리부의 경도는 Nd:YAG레이저보다 HRC 3.9(Hv 100.86) 높게 나타나며 유효경화깊이 또한 더 깊다. 이것은 열간단조금형소재에 레이저를 조사했을 때 다이오드레이저의 경우 Nd:YAG레이저보다 모재표면으로의 열전달현상이 더 크기 때문이라 생각된다.
3. 다이오드레이저로 실 양산금형을 표면경화처리 할 경우 경도 및 경화깊이의 증가효과로 인해 금형마모 속도를 감소시켜 금형제작 비용의 절감이 가능할 것으로 생각된다.

#### V. 참고문헌

1. F. Bachmann, High Power kW-range diode lasers for direct materials processing : High power laser conference, September 18-22, 2000
2. 정대현, 레이저에 의한 자동차 부품의 열처리 기술 : 자동차공학회지, 2002(8), pp. 22-26
3. Rofin-Sinar, Operating manual for DL 025 S
4. 박근웅, 이상운, 한유희, CO<sub>2</sub>레이저 표면경화 처리된 회주철의 기계적 성질에 관한 연구 : 제4차 레이저 가공기술 심포지움, October 5-6, 1993
5. W. Amende, Haerten von werkstoffen und Bauteuen des Maschinenbau mit dem hochleistungsLaser, VDI, S. 5-6