SM45C강의 연속파 Nd:YAG레이저표면경화와 고주파표면경화특성 비교

신호준*(조선대 대학원 정밀기계공학과), 유영태(조선대 기전공학과), 안동규(조선대 기계공학과), 신병헌(조선대 기계공학부)

Comparison of Characteristics on Induction and Continuous Nd:YAG Laser Surface hardening of SM45C Steel

H. J. Shin(Precision Mech. Eng. Dept., CHSU), Y. T. Yoo(Mechatronics. Dept., CHSU), D. G. Ahn(Mech. Eng. Dept., CHSU), B. H. Shin(Mech. Eng. Dept., CHSU)

ABSTRACT

Laser heat treatment technology is used for improving the feature of fatigue resistance and wear resistance in mobile parts. The purpose of this study is to compare the characteristics of laser heat treatment and high frequency heat treatment, which is commonly used in industrial place. For the preemptive experiment, the distribution, depth and size of hardening and its micro-structural features were compared between surface heat treatment case by defocusing and variables of each process for heat treatment by exclusively manufactured heat treatment optical system.

As a result, high frequency heat treatment has wide distribution of hardening depth and width about 3 times larger than laser heat treatment, however, its average hardness showed 621.4Hv which is smaller than the average hardness of laser heat treatment with 691Hv.

Key Words : Laser Surface Hardening(레이저표면경화), Induction Surface Hardening(고주파표면경화), Medium Carbon Steel SM45C(중탄소강 SM45C), 미세조직특성(Micro-Structure Characteristics), Viker's Hardness Profile(비커스경도분포), Continuous Wave Nd:YAG Laser(CW Nd:YAG 레이저)

1. 서론

산업사회의 과학기술이 발전하면서 자동차부품이나 항공기부품의 표면경화처리에 고출력레이저의 활용이 증가하고 있다. 레이저로 표면처리하면 터빈블레이드, 크랭크축, 캠축 등과 같은 부품의 내마모성이 증가하여 부품의 수명을 증가 시켜주기 때문이다. 레이저로 표면경화시키는 방법은 고에너지 밀도의 레이저빔을 표면에 조사시키면 매우 빠른 속도로 표면온도가 상승하여 오스테나이트화 온도로 급격히 상승한다. 그러나 내부모재는 냉각된 상태로 남아있기 때문에 레이저빔이 이동하면서 매우 빠르게 냉각하면 마르텐사이트 조직으로 되는 특징이 있다.

레이저 열처리는 화염경화법이나 침탄법, 고주파 열처리에 비하여 부품 변형이 적고 열처리 시간이 빠를 뿐만 아니라, 국부적인 부분을 선택적으로 열처리할 수 있는 특징을 가지고 있다. 레이저로 표면 열처리할 경우 재료의 화학적 성질뿐만 아니라 레이저빔의 흡수율, 반사율이 표면경화공정의 중요한 변수로 작용한다. 그리고 레이저 공정변수로는 레이저빔의 출력, 파장, 초점거리, 시편표면에서 초점면적, 레이저빔의 이송속도, 보호가스의 종류와 공정변수를 고려해서 최적의 상태를 결정해야한다. 레이저빔을 이용하는 열처리 공정변수가 다양하고 표준화되어 있기 때문에 최적의 상태를 결정해야 하기 위한 많은 연구자들의 관심이 있다.(1)

A. I. Katsamas(2)는 연속파형 CO_2레이저 3kW를 이용해서 15CrNi6의 시편을 코팅처리하거나 샌드블라스팅처리하여 표면경도를 모재의 경도보다 2.5배 증가시켰다. J.Senthil Selvan(3)은 연속파 CO_2레이저

3kW로 En18(AISI 5135)의 표면을 흑색 코팅하거나 샌드블라스팅하여 디포커싱하는 방법으로 온도상승에 따른 표면경화와 내마모성 조직을 연구하였다. 비교적 저출력인 연속파 CO_2레이저 출력0.2kW로 저탄소 붕소강의 표면을 코팅처리하여 표면처리한 연구결과도 있다. D. I. Pantelis[4]는 연속파형 CO_2레이저로 구조용강CK60의 표면을 코팅처리하여 디포커싱하는 방법으로 내마모성과 내부식성을 개선하였다. 이들 연구는 대부분 CO_2레이저로 표면경화 열처리를 실시하였는데, CO_2레이저로 금속을 열처리할 경우 레이저파장이 10.6㎛ 이기 때문에 대부분 표면에서 반사한다. 그래서 CO_2레이저빔으로 열처리할 경우 금속표면에서 반사율을 줄이고 레이저빔 흡수율을 높여 표면처리하기위해 샌드블라스팅하여 흡수율을 높여 표면처리하고 있다.

그러나 파장이 1.06㎛인 Nd:YAG레이저가 고출력화 되면서 CO_2레이저를 주로 사용했던 열처리를 대신 할 수 있게 되었다. Nd:YAG 레이저는 CO_2레이저에 비하여 파장이 짧기 때문에 금속표면에서 흡수율이 높아진다. 금속표면에서 레이저 흡수율이 높아지면 표면을 코팅하거나 샌드블라스팅과 같은 공정을 생략 할 수 있고, 열침투깊이가 커서 CO_2레이저에 비하여 강점이 있다.

이와 같은 이유로 K. H. Lo[5]는 연속파형 Nd:YAG 레이저출력 0.5kW를 이용하여 마르텐사이트 스테인레스강 AISI 400C를 열처리하여 캐비테이션에 의한 내마모성을 개선하였다. K. H. Lo가 Nd:YAG레이저로 열처리 할 때 표면을 코팅하거나 샌드블라스팅처리 하지는 않았지만 레이저빔을 디포커싱하여 멀티패스로 중첩하여 열처리하였다. 디포커싱에 의한 멀티패스로 열처리표면 면적을 증가시킬 경우 중첩되는 부분이 템퍼링되어 경도가 감소되는 경향이 있다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 시편표면에서 열처리 단면적을 증가시킬 수 있도록 열처리 광학계를 구성하여 실험하였다.

본 연구에 사용된 재료는 금형재나 일반기계구조용강으로 많이 사용하는 SM45C를 레이저열처리 하였다. 선행실험으로 디포커싱에 의해 표면열처리한 경우와 열처리광학계를 제작하여 열처리실험한 각각의 공정변수에 따라 경화분포도, 경화깊이, 경도크기 및 금속조직 상태를 비교분석 하였다. 산업현장에서 가장 많이 사용하는 고주파열처리는 전문업체에 의뢰하여 열처리한 결과를 경화깊이, 경도분포, 금속조직변화 등을 레이저열처리특성과 비교하였다.

2. 실 험

2.1 실험방법

2.1.1 레이저표면경화

본 연구에 사용된 시편은 일반공작기계나 금형에서 많이 사용되는 SM45C을 사용했다. 시편의 화학조성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical compositions of spicmens(%)

Carbon Steel	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.42～0.48	0.15～0.35	0.60～0.90	≦ 3	≦ 035

고주파열처리를 하기 전 선행실험으로 시편의 시편두께에 따라 달라지는 레이저열처리특성 실험을 하였다. 고주파열처리는 열처리전문업체에 의뢰하여 열처리한 결과를 토대로 열처리특성을 분석하였다.

실험에 사용한 시편의 크기는 시편 자체에서 자기 퀜칭(self-quenching)을 시켜야 하기 때문에 어느 정도의 임계질량과 두께를 가지고 있어야 하므로 이런 특성을 관찰해보기 위해 두께를 변화시켜 실험하였다. 시편크기를 100×50×3mm로 고정하여 열처리실험 한 후 시편두께를 10mm로 변화시켜 실험하였다.

공정변수는 레이저출력을 1095W로 고정하고, 초점거리가 195mm인 렌즈를 사용했는데 시편표면에서 초점위치를 z=0으로 했을 때 작업거리 z=-2mm ~+2mm, 빔 이동속도를 각각 0.6 ~ 1.0m/min까지 0.1m/min 간격씩 증가시켜 실험하였다. 표면조건을 일정하게 하기 위해 경화실험을 하기 전에 시편의 표면을 연마기를 이용하여 Sand Paper로 연마하고 아세톤 세척 후 레이저 빔을 조사시켰다.

레이저열처리 목적으로 구성한 광학계의 입열량을 분석하기 위해 초점거리 변화에 따른 시편표면에서의 초점면적의 변화를 실험하였다. 조직변화는 경화깊이 변화에 따른 경도측정을 위해 열영향을 주지 않는 리니어 정밀절단기(BUEHLER:isomet 4000 precision Saw(1))를 이용하여 시편의 단면을 절단해서 연마한 후 비커스 경도분포를 관찰하였다. 시편을 폴리싱시켜 Nital(3%)시약으로 부식처리 한 후 광학현미경을 이용하여 경화깊이와 미세조직을 측정하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기(SHIMADZU:HmV-2 model)를 사용하여 0.5kg의 하중을 적용시켰다.

2.1.2 고주파열처리

레이저열처리한 산업현장에서 주로 사용하는 고주파열처리한 경도와 경도크기를 비교하기위해 고주파열처리 하였다. 고주파열처리에 사용한 시편과 시편크기는 레이저열처리용 시편과 동일하다. 고주파열처리도 레이저열처리와 같이 가열시간이 짧은 특성을 가지고 있다. 레이저에 의한 열처리는 금속표면에서 대부분 반사되는 레이저빔을 이용하여 급가

열·냉각되는 자기냉각법에 의한 방법을 이용한다. 고주파열처리는 와전류손실과 표피효과를 이용하는 방법으로 도체 내에 교번자속이 관통하면 도체 내에 발생하는 유도기전력을 이용한다. 이 기전력에 의해 발생하는 와전류(Eddy current)가 임의 저항을 가진 도체 내를 흐르면, 도체 내에 열이 발생하게 된다. 도체 내에 교류전류가 흐를 때 도체의 중심부에는 쇄교 자석수가 많아져 인덕턴스가 커지면서 교류전류가 흐르기 어렵게 되어, 중심부의 전류밀도가 낮아져 대부분 전류는 표면에 집중되어 흐르는 표면효과(skin effect)가 나타나게 된다.

이와 같이 고주파열처리는 와전류와 표피효과를 통해 제품을 빠른 속도로 가열하는 방법을 이용한다. 고주파열처리에서 경화도는 자기장을 형성시키는 유도코일의 형태, 코일의 감긴 횟수, 사용주파수, 교류전력량, 가열속도, 냉각유량, 시편의 성질에 따라 달라진다.

본 실험에서는 산업현장에서 열처리 전문업체에 의뢰하여 고주파열처리를 실시했다. 사용한 공정변수로는 주파수 80kHz, 입력전류 240A, 입력전압 380V, 필라멘트전압 20V, 양극전압 7.5kV를 가하고 시편과 유도코일과의 간극은 1.5~2mm를 유지하고 이송속도는 0.3m/min 하여 실험하였다. 고주파로 가열된 표면은 열처리헤드에 부착된 노즐을 통해 물을 분사시켜 담금질 시켰다.

고주파열처리후 시편절단이나 조직사진 관찰은 레이저열처리한 시편과 동일하게 실시하였다.

2.2 실험장치

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 ㎛이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600㎛인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔 발산각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다. 레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는1000×500×400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5㎛, z축에 대한 위치정밀도는 1 ㎛, 반복정밀도는 8㎛이다.

본 실험을 위해 제작한 레이저열처리용 가공헤드의 렌즈초점거리는 195mm 이고, Size는 1.6"×1.6"이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기중의 오염물질사이의 상호작용을 방지하기 위해서 Ar가스를 45°각도, 압력을1 ~ 3bar 정도로 분사시킨다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 레이저열처리 광학계의 계략도를 각각 Fig. 1(a), (b)와 같다.

열처리를 위해 구성한 광학계는 Lambda Research

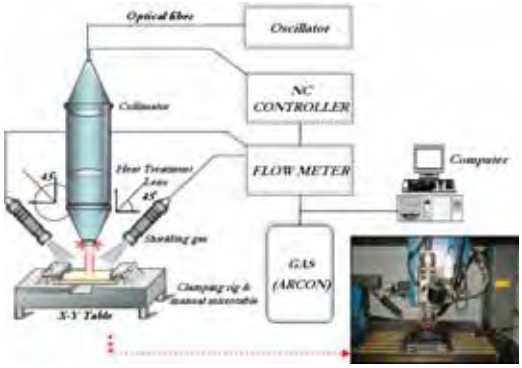


Fig. 1(a) Schematic of the laser Heat treatment

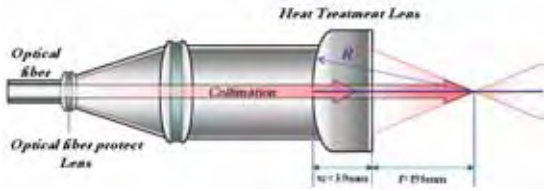


Fig. 1(b) Schematic diagram of laser heat treatment optical system

Optics Inc.에 의뢰하여 제작한 것으로 반원통형이다. 렌즈의 재질은 UV garde F.S.이고, 초점거리는 195mm이며, W×L(40×40mm), tc(5.9mm), R(101.7mm) 렌즈를 통과한 빔의 모양은 타원형이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레이저빔 이송속도변화 따른 경화특성

Fig. 2은 공정변수를 동일한 조건으로 열처리 실험했을 때, SM45C의 체적변화에 따른 경도분포특성을 관찰하였다.

시편두께가 10mm일 때 보다 3mm일 때 경화폭과 경도값 약간 크고 균일하게 형성되었다. 각각의 평균경화값은 3mm일 때 729.9Hv, 10mm일 때 691Hv

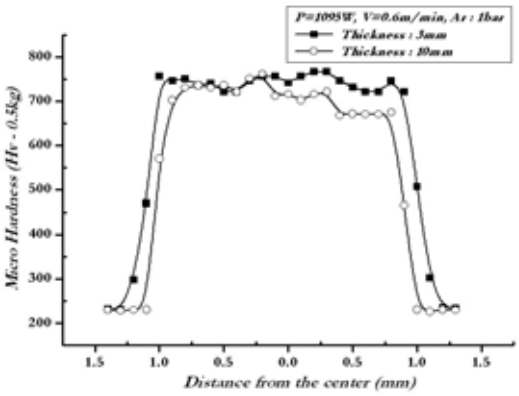


Fig. 2 The variation of micro hardness according to specimen thickness

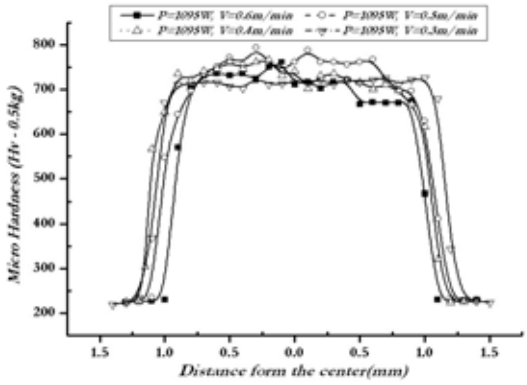


Fig. 3 (a) Micro hardness profile of laser hardened zone for beam travel speed

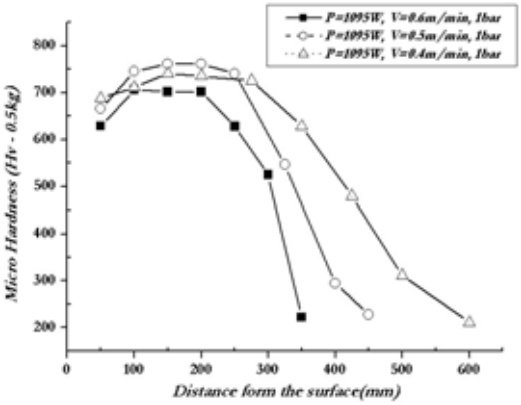


Fig. 3 (c) Micro hardness profile of laser hardened zone for beam travel speed

를 가진다. 시편두께가 10mm일 때 시편내부로 열이 급속하게 전달되어 냉각하는 속도가 두께가 3mm일 때보다 빨라 경화폭도 약 5%정도 작았다. 두께가 작은 경우 경화폭과 경도값이 근소한 차이이지만 크게 나타나는 이유는 급가열할 때 두께가 작아 체적이 크지 않으면 시편 전체에 레이저빔이 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문이다.

Fig. 3은 빔이송속도에 따라 변화하는 경도분포 값을 도시했다. 입열량을 변화시키기 위해 출력, 초점거리, 유량은 고정하고 레이저빔의 이송속도만 변화시켜 레이저빔을 조사시켰을 때 경화값과 경화분포를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 시편 표면으로부터 아래방향 100㎛지점을 기준으로 하여 경도분포를 측정한 값이다. Fig. 3(b)의 경우 레이저빔이송속도를

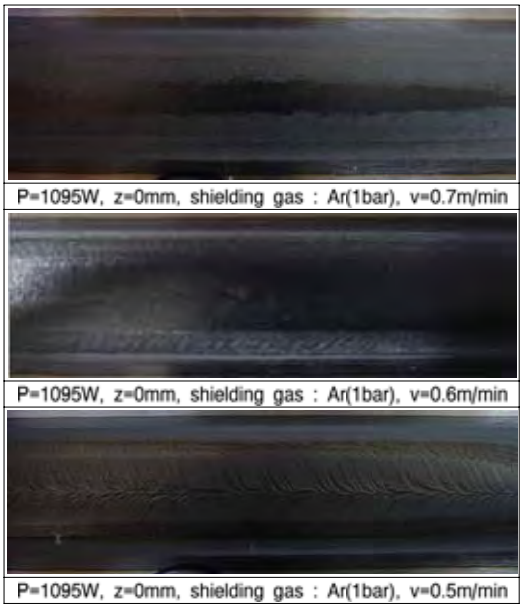


Fig. 3(b) Surface bead shape after Laser Surface hardening

변화시키면서 열처리했을 때 표면비드 형상을 관찰하였다. 빔이송속도를 감소시켜 0.5m/min에서는 표면상태가 나뭇잎가지무늬가 발생하였다.

레이저빔의 이송속도를 감소시키면 표면 중심부 일부가 과열되고 레이저빔이 시편표면에 조사된 후 모재와의 경계부위 주위로 냉각속도가 빨라져 레이저빔이 조사되지 않은 양쪽 모재방향으로 열이 급속히 냉각하면서 발생하는 현상이다. 이런 현상은 레이저용접 할 때 용융풀 중심에서 양쪽 모재 방향으로 급냉각 때문에 발생하는 수지상조직형성과 유사하다.

레이저빔의 이송속도가 0.6m/min일 때 경화폭은 22.45mm 평균경화값은 669Hv였다. 레이저빔 이송속도를 0.5m/min로 했을 때 경화폭은 22.8mm이고, 평균경화값은 722Hv로 약간 증가 하였다. 레이저빔의 이송속도를 0.4m/min로 입열량을 증가시켰을 때는 경화폭은 23.8mm으로 증가하였으나 평균경도값은 오히려 718Hv로 감소하였다. 레이저빔 이송속도를 0.3m/min 로 낮추어 입열량을 더욱 증가시키면 경화폭은 24.7m/min로 더 증가하나 평균경도값은 약간

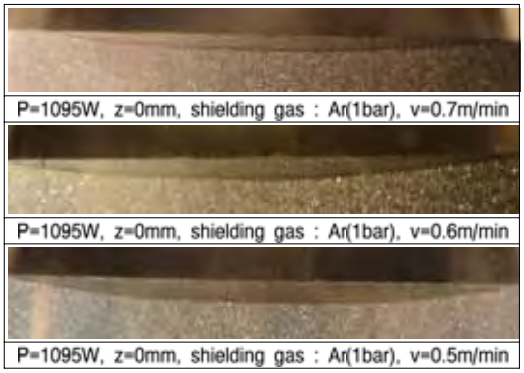


Fig. 3(d) Cross-section shape after Laser surface hardening

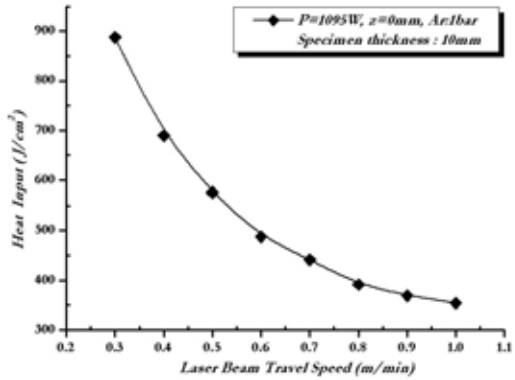


Fig. 4(a) Heat input according to the heat treatment travel speed

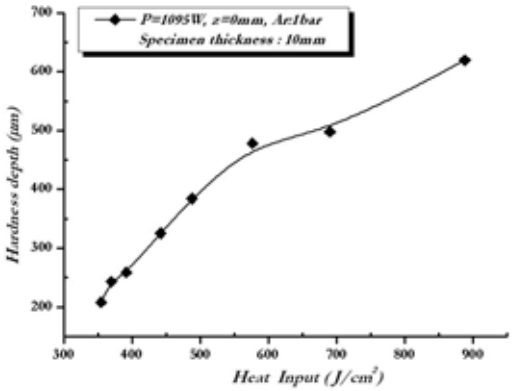


Fig. 4(b) Hardness depth according to Heat input

더 낮아져 714Hv가 되었다.

이와 같은 이유는 레이저열처리가 표면열원을 이용하기 때문에 입열량을 증가시키면 표면일부가 증발하여 경도는 감소하고 표면 열전달 때문에 경화폭은 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 모재의 경도와 비교하면 경도값이 약3배이상 증가하여 양호한 경도값을 나타내고 있다. Fig. 3(a)의 경도분포와 경도값을 표면으로부터 깊이방향으로의 경도값을 분석하기 위해 Fig. 3(c)에 나타냈다.

Fig. 3(c)에 나타낸 것처럼 레이저빔 이송속도가 작아져 입열량이 증가하면 깊이방향으로도 경도분포가 크게 나타났다. 시편표면으로부터 깊이방향으로 경도값이 가장 깊은 이송속도는 입열량이 가장 큰 0.4m/min이였다. 미소한 차이이지만 경도값이 가장 큰 레이저빔의 이송속도값은 0.5m/min 이였다. 이와 같은 이유는 Fig. 3(d)의 결과에서 언급한 것처럼 레이저빔 이송속도가 0.4m/min로 입열량이 클 경우 표면의 재용융 때문에 탄소와 같은 일부 원소증발과 관련이 있다. Fig. 3(a)에 나타낸 것처럼 경도값의 편차(fluctuation)이 발생하는 것은 탄화물의 석출이 균일하지 않기(inhomogenous) 때문이다.

Fig. 3(c)의 경도값은 표면보다 약 100㎛ ~ 200㎛ 사이에서 경도값이 가장 큰이유는 이부분에서 미세조직이 마르텐사이트조직으로 더욱 치밀하게 변태(transformation)되기 때문이다.

Fig. 3(d)는 레이저빔의 이송속도를 0.6m/min, 0.5m/min, 0.4m/min로 감소시키면서 열처리한 경화깊이와 열처리단면이다. Fig. 3(d)의 실험 결과값을 측정한 경화깊이는 각각 384.32㎛, 478.05㎛, 498㎛로 증가하였다. 레이저빔의 이송속도 변화에 따른 입열량의 변화를 분석하기 위해 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4(a)에 의하면 레이저빔의 이송속도 변화에 따라 입열량의 변화가 $E = a + bX + cX^2$의 형태로 변화하고 있다. 여기서 a, b, c는 상수이고, X는 빔이송속도이고, 실험값a는 1469, b는 -2411, c는 1311, E는 입열량이다. Fig. 4(b)은 입열량의 변화에 대한 경화깊이 변화를 나타냈다. 입열량변화에 대한 경화깊이 변화는 실험식 $H_d = a(1+E)^b$을 얻었다. H_d는 경화깊이 a, b는 상수로 각각 1과 0.95이다. 그러나 레이저빔에 의한 표면경화처리는 표면열원을 이용하기 때문에 경화깊이를 증가시키기 위해 입열량을 크게 증가 시키면 Fig. 3(b)에서 언급한 것처럼 표면일부가 용융될 수도 있다.

Fig. 4과 관련하여 레이저빔 이송속도 변화에 따른 경화폭과 경화깊이를 Fig. 5에 나타냈다.

레이저빔의 이송속도가 증가할수록 입열량이 감소하여 경화폭과 경화깊이가 감소하고 있다. 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 경화깊이 감소가 경화폭의 감소보다 크게 나타나고 있다. 이것은 레이저빔으로 표면경화 할 때 표면열원을 이용하기 때문에 깊이 방향보다 표면 열전도가 더 크기 때문이다. 또한편으로는 시편표면부에 레이저빔이 조사되는 이송속도가 빨라지면 입열량이 감소하기 때문에 표면층의 복합탄화물의 고용이 감소하고 표면층의 변태경화능이 감소하여 경도값이 감소하였다.

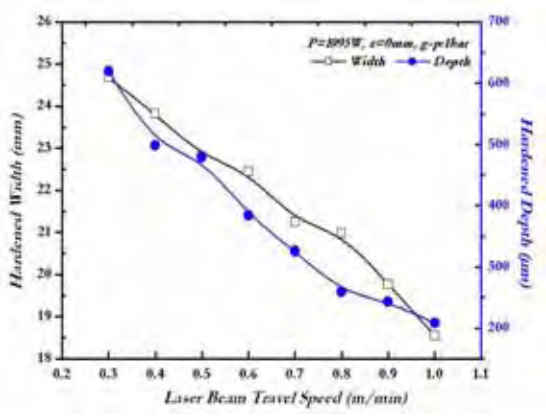


Fig. 5 The Hardened Width & Depth according to Laser Beam travel speeds

레이저빔의 이송속도를 0.3m/min에서는 경화폭과 경화깊이가 비슷했지만 0.3m/min 부터는 일부표면에 용융이 발생했기 때문에 더 이상 입열량을 증가시켜 실험은 하지 않았다. 레이저빔의 이송속도를 1.0m/min 에서는 오히려 경화깊이가 경화폭보다 크게 나타났다.

3.2 고주파표면경화

고주파열처리는 레이저열처리와 다르게 자기퀜칭(self-quenching)에 의한 급냉각법을 사용하는 것이 아니라, 냉각수를 분사 시켜 냉각표면을 경화시킨다. 냉각수와 와전류저항을 이용한다는 것만 제외하면 급속가열 하는 방법 등을 비교할 때 공정자동화가 가능하여 레이저열처리와 생산성은 비슷하다.

고주파열처리도 매우 빠른 가열로 인해 오스테나이트화가 빠르게 진행되어 표면경도는 크고 경화깊이는 최소한으로 얇은 조직을 얻을 수 있다. 탄소강을 고주파열처리할 경우 주파수가 낮아 경화깊이가 너무 깊으면 표면층에 높은 인장응력이 형성되어 크랙이 발생 할 수도 있다. 또 하나의 변수로는 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변태가 일어나는 동안 퀜칭이 너무 급격하게 진행되어도 경화깊이가 지나치게 깊어진다. 일반적으로 고주파열처리에서는 주파수가 높아질수록 에너지를 좁은 부분에 집중하기 쉽고, 주파수가 낮아지면 에너지는 널리 분포되는 성질이 있다. 그래서 에너지를 시편의 표면에만 흡수시키기 위해서는 시편이 작을수록 높은 주파수가 필요하다. 시편이 큰 경우에는 비교적 낮은 주파수라도 효과적으로 흡수되며 전류대폭 δ는 다음 식으로 표현된다.[6]

$$\delta = 5.03\sqrt{\rho/\mu} \cdot f(cm)$$

전류대의 폭 δ는 전류의 침투깊이이며, ρ는 금속의 전기저항율($\mu\Omega$), μ는 금속의 비투자율, f 는 주파수(Hz)이다.

본 실험에서는 산업체 열처리전문업체에서 금형, 크랭크축, 일반축류에 요구되는 공정변수를 사용하여 열처리한 결과와 비교하였다.

SM45C를 고주파열처리한 결과 최대경도값은 692Hv, 평균경도값은 621.4Hv이고, 경화깊이는 2173㎛였다.

레이저열처리는 가변파장 레이저를 열처리 산업현장에서 활발히 활용되지 못하고 있는 점을 고려할 때, 고주파열처리는 주파수를 조절하여 경화깊이를 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다.

그러나 고주파열처리중 진공관식 발진장치는 진공관 수명이 짧고(약 100시간) 회로에 수 10kV의 고전압이 필요한 단점이 있다. 고주파 때문에 누전파가 발생하여 전자기기나 통신 장해가 발생할 수 있고 제어기기·통신기기 등의 오작동과 이상음의 발생도 단점으로 작용한다.

시편의 굴곡, 형상, 치수 등이 불균일할 경우에는 열전도에도 차이가 발생하여 부분적인 공급전력의 조정이 필요하게 된다. 코일이 이동하면서 시편표면을 물로 냉각 시키는 것도 환경적인 측면이나 시스템구성 측면에도 고려해야한다. 이런 문제점은 Fig. 6과 같이 직사각형의 모서리부분을 균일하게 표면경화 시키지 못한다. 이것은 고주파열처리시 초기에 과열이 발생해서 열침투깊이가 커지기 때문이고, 이는 열처리 초기부터 냉각수를 분사하지 않고 충분히 가열된 수초 후에 냉각수로 코일에서 발생한 열을 냉각시켜 열처리하기 때문이다. 코일이 횡방향으로 이동하면서 열침투깊이는 6000㎛이상 진행한 뒤 열침투깊이가 일정하게 되는 단점이 있다.

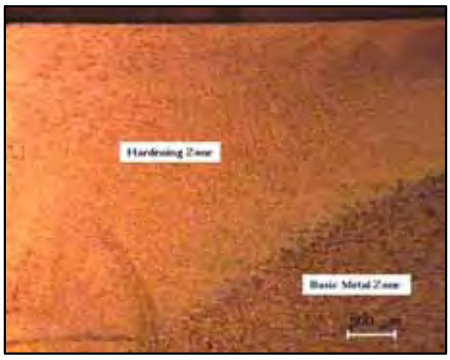


Fig. 6 Cross-Section Photo after Induction surface hardening(×2.5)

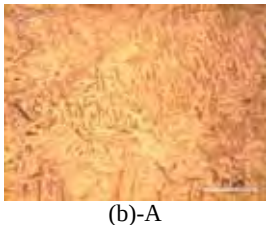
3.3 미세조직특성

Fig. 7은 레이저출력이 1095W, 빔 이송속도를 0.5m/min으로 실험한 결과이다. Fig. 7(a)은 5배율로 미세조직을 관찰한 후 표면에서 깊이방향으로 미세조직을 A~D까지 ×100율로 Fig. 7(b)에 도시화했다.

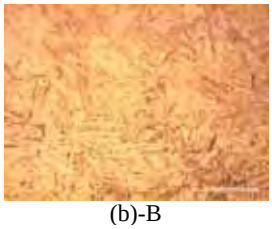
A와 B는 레이저빔이 시편표면에 조사되었을 때 매우 빠른 속도로 오스테나이트화 온도로 상승한 후 급냉각하여 미세한 침상조직의 마르텐사이트 조직으로 변태된 결과를 보여주고 있다. 또한 B의 경우는 마르텐사이트입자가 A부분에 비해 치밀하게 나타나 Fig. 3(c)가 같은 경도값을 나타난다. 이와 같은 현상은 미세하지만 표면층의 용융 때문에 냉각속도가 낮아져 마르텐사이트 생성량이 감소하고 퍼얼라이트가 증가하여 연화되였기 때문이다.

C의 경우는 순간적인 가열냉각과정으로 인하여 오스테나이트 유지 시간이 짧고 급격한 변태과정이 일어나 미량의 잔류 오스테나이트가 나타나고 있으며, 평균경도값은 600Hv을 가진다. D는 모재와 열처

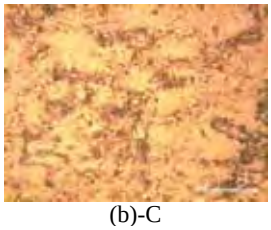
(a)



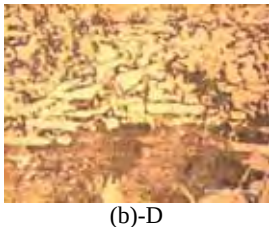
(b)-A



(b)-B



(b)-C

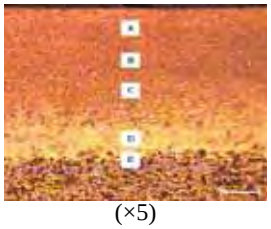


(b)-D

Fig. 7 Microstructure Photo of Cross-section after Laser Surface hardening

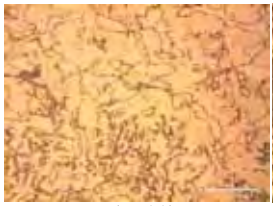
리된 부분과의 경계부위로 평균경도가 380Hv인 위치이다. D부분 아래로는 모재의 조직사진으로 열처리된 부분보다 조직이 대체적으로 균일하지만 조직의 크기는 크고 조밀하지 못하며, 이 때 경도가 250Hv정도였다.

Fig. 8는 고주파표면경화 했을 때 미세조직사진이다. A~C부분의 경우 평균 경도값이 621.4Hv로 조직은 미세한 흑색 및 층상의 펄라이트조직과 잔류오스테나이트 조직이 혼합된 상태을 유지하고 있다. 이는 Fig. 7에서 관찰된 C부분의 잔류오스테나이트



(×5)

A~C(×100)



D(×100)

E(×100)

Fig. 8 Microstructure Photo of Cross-section after Induction Surface hardening

조직과 같은 평균경도값을 가지는 것을 알 수 있다. 경화깊이는 2173㎛로 경화층은 레이저표면경화보다 깊게 분포되나 경도값은 작게 나타났다. 레이저표면경화와는 달리 경도깊이는 깊으나 열처리를 시작하는 시편초기 시작위치에서 Fig. 6에서처럼 지나친 입열량 때문에 균일한 경화깊이를 얻지 못하고 있어 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

CW Nd:YAG 레이저를 이용하여 SM45C의 표면경화처리하는 경우 주요 공정 인자인 레이저 출력과 빔 이동속도, 디포커싱된 초점위치가 표면경화 특성에 미치는 영향을 연구한 결과와 고주파 표면경화처리시 발생하는 경화특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시편두께가 10mm일 때 시편내부로 열이 급속하게 전달되어 냉각하는 속도가 두께가 3mm일 때보다 빨라 경화폭은 약 5%정도 작았다. 이런 현상은 급가열할 때 두께가 작아 체적이 크지 않으면 시편 전체에 레이저빔이 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 평균경도값은 각각 10mm일 때 691Hv, 3mm일 때 729.9Hv를 가진다.
2. 레이저빔 이송속도 변화에 따라 입열량의 변화가 $E = a + bX + cX^2$의 형태로 변화하고 있다. 여기서 a, b, c는 상수이로, X는 빔이송속도이고, a는 1469, b는 -2411, c는 1311 E는 입열량이다.
3. 입열량변화에 대한 경화깊이 변화는 실험식 $H_d = a(1+E)^b$을 얻었다. Hd는 경화깊이 a, b는 상수로 각각 1과 0.95이다.
4. 고주파열처리시 코일이 횡방향으로 이동하면서 열침투깊이는 6000㎛이상 진행한 뒤 열침투깊이가 일정하게 되는 단점이 있다.
5. 레이저열처리는 고주파열처리보다 경화깊이는 작지만 높은 경도값을 가진다.

후기

이 논문은 산업자원부 한국산업기술평가원지정 지역협력연구센터인 조선대학교 산학협력단 레이저응용 신기술개발 연구 센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Janez, G. and Roman S., "Influence of laser surface melt-hardening conditions on residual stresses in thin plates", Surface and Coating Technology, Vol. 100-101, pp. 455-4580, 1998.

2. Katsamas, A. I. and Haidemenopoulos, G. N., "Laser beam carburizing of low-alloy steels", Surface and Coatings Technology, Vol. 139, pp. 183-191, 2001.
3. J. Senthil Selvan., "Effect of laser surface hardening on En18(AISI 5135) steel", Journal of Material Processing Technology, Vol. 91, pp. 29 -36, 1999.
4. D. I. Pantelis., E. Bouyiouri., N. Kouloumbi., and P. Vassiliou., "Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel", Surface and Coatings Technology., Vol. 298, pp. 1257-134, 2002.
5. K. H. Lo., F. T. Cheng., and H. C. Man., "Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance", Surface and Coating Technology, Vol. 173, pp. 96-104, 2003.
6. 호시히데오, 정인상., “고주파열처리”, 열처리공학회지, 12권3호., 1999, pp.251-269.