

技術解説

레이저 표면경화처리 Laser Surface Hardening Treatment

이 상 윤

동아대학교 공과대학 금속공학과

1. 서 론

레이저 (laser : light amplification by stimulated emission of radiation) 의 첫자를 따서 만든 단어임) 는 대단히 큰 열에너지를 매우 빠른 속도로 정확하게 전달할 수 있으므로 공업적으로 광범위하게 재료가공에 이용되고 있으며 주로 표면경화(surface hardening), 용접(welding), 천공(drilling), 절단(cutting) 등에 사용된다. 레이저 가공을 이용할 수 있는 재료의 종류도 금속, 프라스틱, 나무, 종이, 섬유, 세라믹, 반도체재료 등 다양하다.

레이저는 10여가지 종류가 있으며 이 가운데 주로 쓰이고 있는 것은 Nd : YAG(neodymium : yttrium-aluminum garnet) 레이저 및 CO₂ 레이저의 두 종류이다. ND : YAG 레이저는 1.06 μm 의 파장을 가지며 주로 얇은 금속의 정밀 가공에 사용하므로 약 1 Kw 이내의 연속적인 낮은 출력을 사용하며 경우에 따라서 10 Kw 까지의 간헐적 펄스형 출력을 짧은 시간동안 사용할 수 있다. CO₂ 레이저는 10.6 μm 의 더 긴파장으로 대부분 연속적인 20 Kw 이내의 고출력으로서 두꺼운 금속의 가공에 사용된다. 따라서 표면변태경화 열처리에 사용되는 레이저는 주로 CO₂ 레이저이다.

철강재료는 열전도성이 대단히 좋기 때문에 부품의 내부에 온도의 영향을 주지 않고 표면층만 오스테나이트화 온도로 가열하려면 매우 강력하게 집중된 열을 사용해야 한다. 이와같이 부품의 표면을 선택적으로 가열을 급속히 한 다음 부품내부의 가열되지 않고 차가운 부분에 의해서 자기 쿼칭(self-quenching) 현상이 일어나서 열이 표면에서 내부로 빨리 전도되면서 표면경화에 필요한 마르텐사

이트(martensite)가 재료 표면에 형성된다. 레이저는 1960 년에 발명된 이래 1970 년대에 이르러 공업적으로 표면경화를 비롯하여 재료 가공에 이용되었으며 부품의 표면에 매우 강력한 열에너지를 급속히 발생시킬 수 있기 때문에 이 결과 부품내에 온도 변화가 매우 심하게 일어나서 경화에 필요한 냉각제가 별도로 필요없으며 자기 쿼칭에 의해서 표면경화 된다. 레이저 빔은 전자기방사의 형태로 연속적 또는 펄스로 방출되는 빛의 빔이며 쉽게 조절이 되고 진공이 필요없으며 연소생성물을 만들지 않으므로 표면경화 열처리에 매우 적합하다.

2. 레이저 표면경화의 기초사항

레이저 빔이 부품의 표면에 부딪치면 그 에너지 일부가 열로서 표면에 흡수된다. 레이저 빔의 전력밀도가 충분히 높으면 열이 재료내부로 전도되어 없어지는 것보다 더 빠른 속도로 표면에 축적되어 표면층에 온도가 빨리 상승하여 매우 짧은 시간내에 표면의 얇은 층은 오스테나이트화 온도에 도달하는 반면 부품의 중심부는 온도가 오르지 않고 냉각된 상태에 있게 된다. 전력밀도가 그다지 높지 않은 500 W/cm²인 경우에도 500℃/mm 의 온도구배 (temperature gradient)를 얻을 수 있다. 필요한 전력밀도(power density)는 그림 1 에서 나타낸 바와같이 재료 가공 별로 표시된 영역에서 레이저 빔의 상호작용시간에 따라 다르다. 그림 2 에서 보는 바와같이 정사각형 모양의 레이저 빔이 부품 표면 위에 일정한 속도로 이동하게 되면 빔이 지나가는 표면의 한 부분이 급속히 가열된 다음 빔이 통과하면 내부로 열전도되면서 가열 부분이 급냉하

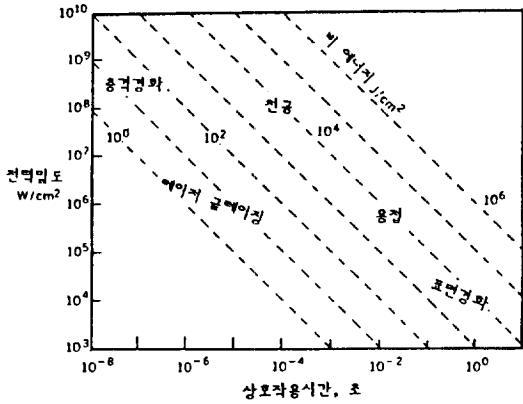


그림 1. 레이저 재료가공 영역별로 나타낸 전력밀도와 상호 작용시간과의 관계.

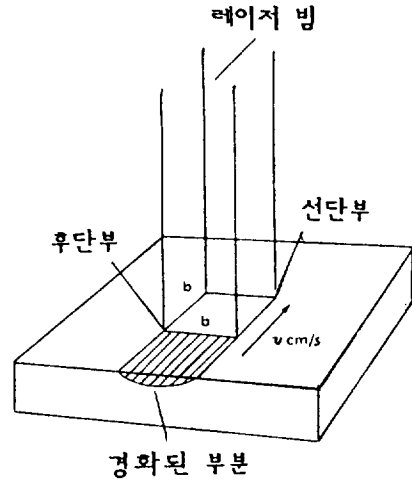


그림 2. 판재의 표면 위에 이동하는 균일한 전력밀도를 가진 정사각형 레이저 빔에 의한 표면경화 부분.

게 된다. 이와같이 전력밀도와 레이저 빔의 이동속도를 정확하게 선택하면 필요한 표면층 깊이로 경화할 수 있다. 일반적으로 레이저 표면경화 열처리에서 사용되는 빔은 정사각형 또는 직사각형의 비교적 넓은 면적을 가열하는 것이 사용되며 전력밀도는 좁은 면적에 강렬하게 가열하는 용접 및 절단에 사용되는 경우보다 훨씬 낮다. 일반적으로 사용되는 전력밀도의 범위는 1000-2000 W/cm²이고 경우에 따라서 5000 W/cm²만큼 높게하거나 또는 500 W/cm² 정도로 낮게 하여 표면경화하기도 한다.

레이저 가열에 의하여 얻을 수 있는 표면층의 경화깊이는 재료의 경화능(hardenability)에 따라 다르며 중탄소강의 경우 1.3 mm 정도이다. 가열과 냉각속도가 대단히 높기 때문에 일반 경화처리에 의하여 경화가 잘 되지않는 연강도 레이저를 이용하여 경화할 수 있다. 철강재료는 적외선 전자기 방사선의 흡수성(absorptivity)이 좋지 않으므로 레이저에너지를 효과적으로 사용하기 위하여 재료표면에 흡수성이 좋은 망간 인산염으로 화학코팅을 하거나 흑연, 규소 등으로서 칠한 다음 열처리한다. 이러한 코팅재는 가열과정 중 일부 타서 없어지기도 하고 일부 남아있기도 하며 표면온도가 최대값에 도달하였음을 나타낸다. 어떠한 경우라도 표면 코팅을 했을때 흡수성이 90%이상 되어 가열효과를 높인다.

레이저 표면경화의 주요 장점을 든다면 입력 전력의 조절이 정확하고 높은 전력밀도를 공급할 수 있으므로 전체 입력에너지를 최소화하며 이로 인해 치수 변형을 최소화할 수 있다. 레이저 빔은 부품 표면상에 일반적으로 접근할 수 없는 부분에도 도달하여 경화시킬 수 있다. 또한 진

공이나 가스 분위기가 필요없으며 레이저 발생장치에서 열처리 부품까지의 거리가 크기때문에 대형제품이나 불규칙한 형상의 부품의 표면경화처리도 가능하다. 반면에 단점으로는 표면층의 경화깊이가 제한되어 있고 레이저 장치의 구입설치비가 높다. 따라서 레이저 경화에 대한 경제성 분석을 철저히 할 필요가 있다.

3. 레이저 표면경화반응

레이저 표면경화는 근본적으로 고주파 및 화염 표면경화와 같은 금속학적 반응이 일어나기 때문에 서로 다르지 않지만 오스테나이트화 온도까지 가열하는데 소요시간이 대단히 짧다. 레이저 경화 중 가열시간은 수초 또는 1초의 몇 분의 1에 불과하므로 냉각시간보다 짧은 경우가 많으며 "상향 퀘칭"(up-quenching)이라는 표현을 쓰는 경우가 있다. 이와같이 가열속도가 빠름에 따른 문제는 균질한 오스테나이트 고용체를 형성하는데 필요한 탄소의 재 분포를 위한 확산과정이 필요하므로 짧지만 일정한 시간 간격이 있어야 한다. 가열속도가 대단히 높은 경우의 변태 및 확산과정은 불확실하며 레이저 표면경화과정을 결정하는데 어려움을 준다. 탄소강을 가열할 때 가열속도가 느리면 A₁점에서 오스테나이트 변태가 시작되고 A₃점에서 변태가 완료되지만 가열속도가 빠르면 평형상태에서 훨씬 벗어나서 A₃점이 높은 온도쪽으로 올라가는 경향이 있다. 가열속도가 느릴 때 오스테나이트 형성에 충분히 높

은 온도라 하더라도 가열속도가 빠르면 그 같은 온도는 오스테나이트 형성을 시작하는데도 불충분할 수 있다. 그러므로 레이저 경화에 사용하는 온도 변수는 일반 경화에 사용하는 오스테나이트화 온도보다 훨씬 높은 최고 온도가 되도록 결정한다.

상온에서 강 및 주철의 현미경조직은 탄소를 함유하면서 철탄화물 또는 흑연의 형태도 있으며 켈칭에 의해서 경화시키기 위해서 이 탄소가 반드시 오스테나이트 내에 균일하게 고용되어야 하므로 레이저 경화에 사용되는 고온에서도 시간이 필요한 과정이며 어떤 경우에는 레이저 경화과정이 너무 빨라서 확산이 완전히 일어날 수 없다. 이 문제는 열처리하기 전 소재의 탄소 분포가 균일하지 않는 경우에 가장 뚜렷이 나타난다. 레이저 경화시 가열속도가 높고 A_3 점 이상에서 균일한 오스테나이트를 형성하는데 충분한 시간이 필요한 경우 가능한대로 높은 최고온도(peak temperature)로 가열해야 한다. 이러한 가열조건 하에서 $5-20\mu\text{m}$ 의 얇은 표면층이 형성하는 경향이 있으며 이 층에 형성된 상(phase)은 아직 정확하게 분석되지 않고 있다. X-선 분석에 의하면 레이저 경화층에 잔류 오스테나이트(retained austenite)가 있으나 이 잔류 오스테나이트 형성에 영향을 주는 레이저 가공인자에 대해서는 분명하지 않다.

레이저 표면경화과정에서 표면온도에 대한 상한계치는 재료의 용점에 의해서 결정된다. 왜냐하면 표면의 용융은 대부분의 경우 바람직하지 못하기 때문이다. 간단한 평면상에서는 표면 용융은 쉽게 피할 수 있으나 복잡한 구조를 가진 부품의 표면에서 온도는 비록 레이저 빔의 단면에 따라 전력밀도가 균일하더라도 빔이 부딪힌 면적에 따라 표면온도의 변화가 있다. 이러한 현상은 표면이 곡면일때 일어나며 특히 빔이 매우 기울어진 각도로 표면적에 부딪칠 때 잘 일어난다. 따라서 가열 부분의 전력밀도가 불균일해지고 열유동이 고르지 못하여 빔이 조사된 표면의 일부는 다른 부분이 아직 경화에 필요한 온도에 도달하기 전에 용점에 이르게 된다. 특히 날카로운 모서리(edge)나 모퉁이(corner)에는 열흐름의 집중현상이 일어나기 쉽기 때문에 용융하여 모서리 부분의 끝이 둥글게 되어진다.

레이저 표면경화에 대한 또 하나의 문제점은 경화 패스(hardening pass)를 겹치도록 하는 것이다. 레이저 빔이 이동할 때 이동방향이 아닌 옆으로 열 흐름이 일어나서 앞 패스에 의해서 이미 경화된 부분을 역 템퍼링(back-

tempering)하게 된다. 빔의 이동속도가 느릴수록 더 많은 열이 이미 경화된 영역으로 확산되는 시간을 갖기때문에 이러한 현상이 더욱 뚜렷하게 일어난다. 레이저 장치에 특별히 제작된 광학경을 사용하면 접히는 면적의 필요성을 상당히 줄일 수 있다. 역 템퍼링된 영역에 걸리는 하중이 적거나 마모가 많이 일어나지 않는 경우에는 역 템퍼링된 영역의 형성이 해롭지 않다. 예를들면 내연기관의 내부벽은 직선이나 나선형으로 레이저 패스로서 경화하여 패스 사이에 경화되지 않는 부분이 있어도 아무런 영향을 주지 않는다.

4. 레이저 경화에서 열 유동

레이저 표면변태경화에서 열 에너지는 부품 표면에서 레이저 방사의 흡수에 의해서 발생된다. 부품의 내부에서의 온도 증가는 열전도에 의해서만 일어나고 다른 열원은 없다. 따라서 흡수된 전력밀도, 가열시간 및 재료의 열적 성질을 알면 원칙적으로 부품내부의 온도분포를 계산할 수 있다. 이러한 사항은 레이저 표면경화처리의 결과를 사전에 예측하여 가장 적합한 전력밀도, 이동속도, 빔 크기를 계산할 수 있기 때문에 고려할 가치가 있다.

CO_2 레이저의 파장이 큰 전자기 방사(적외선)는 상온에서 철강재료에 효과적으로 흡수되지 않으므로 레이저 에너지를 흡수하는 재료로써 부품 표면을 코팅하는 것이 좋다. 레이저 에너지가 표면에서 500 W/cm^2 이상 흡수되면 부품내부로 열전도되는 것보다 표면으로 공급되는 열에너지가 더 크기때문에 표면온도가 대단히 빨리 상승하며 표면으로 공급되는 에너지가 많을수록 표면층에서 온도상승이 빨라져서 부품내의 온도구배가 가파르게 일어난다. 가열할 수 있는 최대표면 온도는 재료의 용점이지만 실제로 이 보다 훨씬 낮은 온도로 유지해야 한다. 이 최대표면온도는 오스테나이트화층의 깊이를 결정하는데 제한 역할을 한다. 그림 3에서 나타낸 바와같이 레이저의 전력밀도가 낮고 빔의 이동속도가 느림에 따라서 표면온도는 더 느리게 오르고 온도구배의 변화가 줄어들어 오스테나이트화층을 더 깊게 형성한다. 그러나 자기 켈칭에 의한 냉각속도가 줄어들면서 표면경화가 충분하게 되지 않는다. 따라서 재료의 용점과 경화능의 복합적 영향은 레이저의 전력밀도에 관계없이 경화층의 깊이를 결정하는데 제한된 역할을 한다. 경화능이 낮은 강을 레이저 경화처리 할 때는 자기 켈칭을 좋도록 하기 위하여 일반적으로 전력밀도

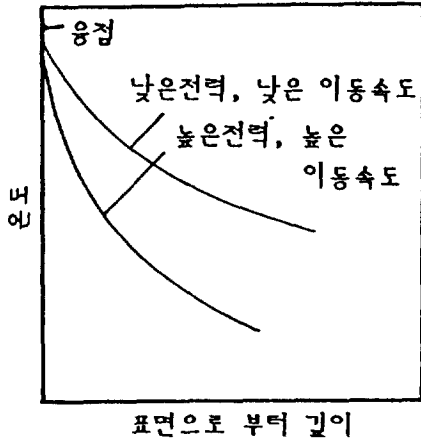


그림 3. 레이저 표면경화에서 열처리 변수가 열의 침투에 미치는 영향.

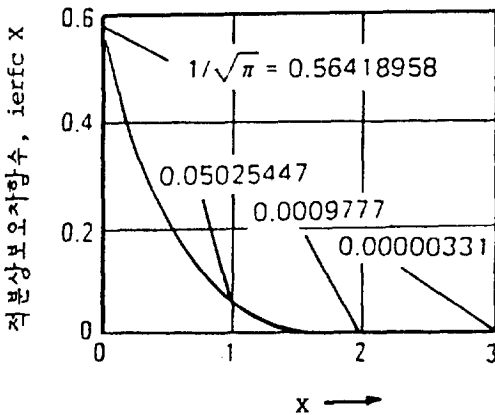


그림 4. 적분 상보 오차함수의 값.

와 빔의 이동속도를 높여야 한다. 균질한 오스테나이트를 형성하기 위하여 시간이 주어져야 하므로 이동속도를 느리게 하는 경우가 많다. 따라서 보통탄소강(plain carbon steel)에서는 경화층을 깊게 얻기가 어렵다. 만약 흡수된 전력밀도, 레이저 빔의 크기, 이동속도 및 재료의 열적성질을 안다면 부품내 온도분포를 계산할 수 있다. 열이 표면에서 수직방향으로 유동이 일어난다면 즉 일차원적 열 유동이라고 가정한다면 온도는 다음식으로 주어진다.

$$T = T_0 + \frac{2Q}{K\sqrt{\alpha t_0}} \text{ierfc} \frac{\delta}{\sqrt{\alpha t_0}} \quad (1)$$

여기서 T는 온도(°C)이고 T₀는 실온(°C)이며 Q는 흡수된 전력밀도(W/cm²)이다. K는 열전도도(W/cm°C)이고

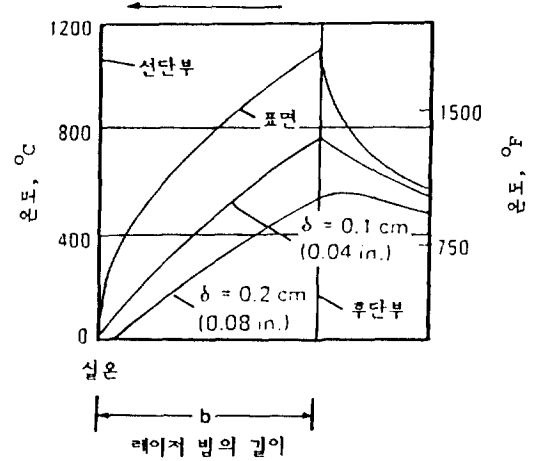


그림 5. 레이저 빔의 크기 1cm×1cm의 중심선에 따라 계산된 온도분포.

α 는 열확산상도(cm²/sec)이며 δ 는 표면에서 거리(cm)이다. t_0 는 조사시간(dwel time, sec)이며 이는 부품표면의 어느 한 점이 레이저 빔에 의하여 조사된 시간이므로 레이저 빔이 이동한 거리를 이동속도로써 나눈 값과 같다. ierfcx는 적분 상보 오차함수(integrated complementary error function)이며 다음과 같이 정의된다.

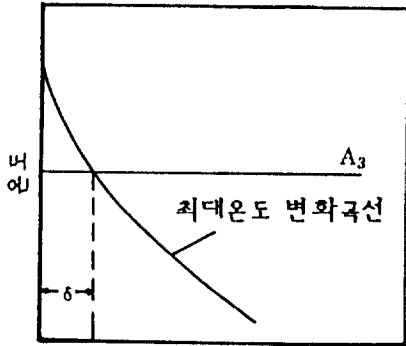
$$\text{ierfc} x = \int_x^\infty (1 - \text{erfc} y) dy$$

여기서 erfc는 오차함수이며, 즉

$$\text{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

그림 4는 적분 상보오차함수의 값을 나타낸 것이다. 온도 T에 대한 (1)식을 평면 위에 이동하는 레이저 빔에 적용한다면 그림 5에 나타낸 바와 같이 빔의 선단부가 평면 위의 일정한 점에 도달함에 따라 빠른 속도로 증가하기 시작해서 빔의 후단부에서 최대온도에 이르게 된다. 표면 바로 아래 점에서는 표면과 비슷하지만 보다 적은 온도증가가 일어난다. 온도 T에 대한 (1)식을 빔의 후단부 아래 깊이 δ 의 여러 값에 적용하여 온도변화 곡선을 그리면 그림 6과 같고 최대온도는 표면부근에서 얻어진다. 따라서 A₃ 변태점을 알면 가능한 경화층의 최대 깊이의 값을 결정할 수 있다.

실제로 열은 표면에 수직방향 뿐만 아니라 부품내부 모



표면으로부터 깊이

그림 6. 레이저 표면경화처리에서 표면 아래 온도변화곡선.

든 방향으로 확산하며 더욱이 표면에서 열의 손실이 일어나고 재료의 열적성질도 일정하지 않고 온도에 따라 변한다. 이러한 모든 인자는 온도 T에 대한 (1)식으로부터 얻은 값에 대한 신뢰성을 감소시킨다. 그럼에도 불구하고 빔의 이동속도가 높은 즉 조사시간 T_D 의 값이 높고 비교적 두께가 큰 부품 및 큰 레이저 빔에 대해서 (1)식으로부터 경화층 깊이를 대체로 정확하게 얻을 수 있다. 예를들면 레이저 빔의 크기가 1.27×1.2 cm 인 경우 부품의 크기가 0.6 cm 이상이고 빔 이동속도가 1 cm/sec 보다 빠를 때 (1)식을 사용할 수 있다.

열이 표면에서 수직방향으로만 이동한다고 가정하면 (1)식을 비교적 간단히 전개하여 부품내 어느 주어진 점에서의 냉각속도를 계산하는데 다음 식을 사용할 수 있다.

$$T = T_0 + 2Q/K \left\{ \sqrt{\alpha t} \operatorname{ierfc} \frac{\delta}{2\sqrt{\alpha t}} - \sqrt{\alpha(t-t_0)} \operatorname{ierfc} \frac{\delta}{2\sqrt{\alpha t-t_0}} \right\} \quad (2)$$

이 식에서 사용된 기호는 (1)식과 같은 의미이고 다만 t는 빔의 선단부가 온도를 알고자 하는 점을 통과한 후 경과한 시간이며 (t-t₀)는 빔의 후단부가 그 점을 통과한 후 경과한 시간 즉, 자기 켜짐에 의한 냉각이 시작한 후 경과한 시간을 뜻한다. (2)식을 사용할 때 중요한 것은 열의 유동이 적합하게 일어나도록 충분한 크기를 가진 부품에 적용하는 것이다. (2)식은 연속냉각변태선도(continuous cooling transformation diagram)과 함께 사용하여 주어진 열처리조건 하에서 자기 켜짐에 의한 냉각속도가 표면 경화에 적합한지 여부를 결정할 수 있다. 표 1은 (1)식과 (2)식을 사용하는데 도움을 주기 위하여 일반적으로 사용

되는 재료에 대한 열전도도 및 열확산도의 값을 나타낸 것이며 이 값들은 상온에서 1000°C까지의 평균치이다. 두 식에서 Q의 값은 실제 적용된 전력밀도가 아니고 흡수된 전력밀도의 추정치임을 알아 두어야 한다.

5. 레이저 표면경화에 영향을 주는 인자

레이저 표면경화는 많은 인자로 부터 영향을 받으며 레이저 빔의 크기, 전력밀도, 빔의 이동속도, 재료의 열적성질, 재료의 레이저 경화능 등을 들 수 있다. 재료의 레이저 경화능은 급속한 가열과 켜짐에 대한 재료의 반응을 말하며 부분적으로 재료의 열처리하기 전의 상태, 즉 어닐링(annealing), 노마라이징(normalizing)등을 실시하였는지의 상태에 따라 다르다. 이러한 인자들 가운데 주요한 것은 전력밀도와 레이저 빔의 이동속도이다. 이동속도는 가능한 빠르게 하여 생산성을 높이는 것이 좋지만 이동속도만으로 생산성을 결정하는 것이 아니고 표면 전체를 경화하기 위하여 빔의 각 패스이동시 이동방향에 수직인 빔의 폭의 크기에 따라 표면적을 경화하는 속도인 면적조사속도(area coverage rate)도 중요하다. 이 면적조사속도는 레이저 표면경화의 결과에 관해서 조사시간과 상관관계에 있으며 전력밀도가 일정한 경우에는 직사각형 빔의 크기에 그다지 영향을 받지 않는다. 따라서 레이저 빔의 면적은 입력 전력에 의해서 제한된다. 만약 빔의 크기가 이동방향으로 매우 좁거나 이동속도가 매우 느린, 즉 조사시간이 매우 긴 경우에는 예외이며 이러한 처리조건 하에서는 이동방향에 직각으로 열손실이 크며 빔의 크기가 열처리 결과에 영향을 준다. 이러한 효과가 나타나는 처리조건은 다음 관계식에 의해서 표시된다.

표 1. 철재료의 열적성질

재료	변태온도		열확산도		열전도도	
	°C	°F	cm ² /s	in. ² /s	W/cm°C	W/in. ² F
1025	.....850	1560	0.073	0.011	0.39	0.085
1045	.....800	1470	0.074	0.011	0.38	0.083
1078	.....725	1335	0.065	0.010	0.36	0.079
4140	.....790	1455	0.070	0.011	0.36	0.079
5130	.....780	1435	0.066	0.010	0.36	0.079
회주철	.....	.....	0.099	0.015	0.46	0.10
	.....	.....	0.148	0.023	0.57	0.125

$$B + vb/4\alpha < 3.5 \quad (3)$$

여기서 b 는 이동방향에서 빔의 크기(cm)이며 v 는 빔의 이동속도(cm/sec)이고 α 는 열확산도(cm²/sec)이다. 레이저 표면경화에서 일반 열처리 조건은 다음과 같다.

- (1) 사용할 수 있는 전력밀도의 범위는 500~5000 W/cm²이고 이에 따른 조사시간의 범위는 0.1~10 초이다. 탄소강에 대한 전력밀도는 보통 1000~1500 W/cm²이며 조사시간은 1~2 초이다.
- (2) 경화능이 높은 재료는 낮은 전력밀도와 긴 조사시간(느린 이동속도)에서 경화될 수 있으며 반면에 경화능이 낮은 재료를 레이저 경화할 때는 전력밀도가 높고 조사시간이 짧아야 한다.
- (3) 전력밀도가 균일한 직사각형 또는 정사각형 레이저 빔이 균일한 경화층을 얻는데 가장 적합하다.
- (4) 전력밀도가 높고 조사시간이 짧을때 경화층이 얇으나 냉각속도가 높고 전력밀도가 낮으면 이와 반대 현상이 일어난다.
- (5) 최대표면온도는 빔의 이동속도의 제곱근에 비례한다. 그러므로 전력밀도를 두 배로 증가시키면 이동속도는 4 배로 증가시켜야 같은 최대 표면온도를 얻을 수 있다.
- (6) 최대표면온도가 같은 경우 전력밀도를 증가시키면 총 입력에너지가 감소하는 결과가 나타난다.

(7) 레이저 표면경화하기 전 퀘칭 및 템퍼링된 강은 조사시간을 어닐링, 노마라이징 또는 구상화처리된 강이나 안정한 복합 탄화물을 함유하는 강 및 주철의 경우에 비해서 더 짧게 해준다.

(8) 작은 부품은 큰 부품에 비해서 전력밀도를 더 높게 하고 조사시간을 더 짧게 하여 경화처리한다.

참고문헌

1. R.Allan, IEEE Spectrum, Vol.16, No.5 May 1979, p.42.
2. T.E.Zavec, M.A.Saifi and M.Notis, Applied Physics Letters, Vol.26, No.4, 1975, p.165.
3. Techfront, Iron Age, March, 1975, p.43.
4. M.Yessik and D.J.Schmatz, SME Paper No. MR 74, 1974, p.962.
5. E.V.Locke, VS Patent No.3, 848, 104.
6. S.L.Engel, SME Paper No. MR 76, 1976, p.857.
7. G.H.Harth, W.C.Leslie, V.G.Gregson and B.A.Sanders, J. of Metals, April 1976, p.172.
8. R.E.Wagner, J. of Applied Physics, Vol.45, 1974, p.4631.
9. F.E.Seaman and D.S.Gnanamuthu, Metal Progress, Aug., 1975, p.79.
10. O.Sandven, Metals Handbook, Vol.4, 9th edition, 1981, p.507.