

技術解説

전자 비임 표면경화처리

Electron Beam Surface Hardening Treatment

이 상 윤

동아대학교 공과대학 금속공학과

1. 서 론

전자 비임 열처리에는 경화할 수 있는 철 합금의 표면을 가속된 전자 비임의 직접 충돌에 의해서 변태온도 이상으로 급속히 가열한 다음 자기 쿨링(self quenching)에 의해서 경화하는 열처리법이다. 대개 0.5-2.5초 동안의 매우 짧은 가열 사이클이 끝나면 전자의 흐름을 급히 중단하여 가열 부분이 자기 쿨링토록 함으로써 압축 응력을 가진 마르텐사이트(martensite) 조적을 형성시키는 표면경화법이다. 전자 비임 표면경화처리는 일반적으로 다듬질 가공 또는 연삭가공된 표면에 적용된다. 가열속도가 빠르고 열처리 제어가 잘 되기 때문에 연삭 또는 변형 교정과 같은 후처리가 거의 필요없는 최신 열처리 기술로서 앞으로 계속적인 연구와 개발이 필요하다.

2. 기본원리

전자 비임이 열처리할 부품 표면에 빠른 속도로 부딪치면 비임 에너지의 상당 부분이 표면의 얇은 층내에서 열로 바뀐다. 그림 1은 표면층을 가열하는데 사용된 비임 전력의 비율과 에너지 전환의 영향을 나타낸 것이다. 철강재 부품인 경우 비임이 수직으로 입사할 때 부품내에서 비임 전력이 열로 바뀌는 비율은 약 75%이다. 나머지 25% 가운데 대부분 전자 배면산란(electron back-scattering)을 통해서 소실되며 X선방사, 2차 전자 및 열의 방출은 비교적 적다. 레이저 또는 프라즈마 처리법과는 반대로 전자 비임은 표면층에 흡수되며 흡수되는 표면층의 두께는 전자의 가속전압에 따라 다르

다. 강에 60 kV의 가속전압을 적용하면 표면층 두께는 약 10 μ m가 된다. 이 흡수층에서 전자의 운동에너지의 전환에 의하여 직접 가열되고 흡수층 아래는 열 발산에 의해서 조금 가열된다. 전자 비임의 에너지가 차단되면 흡수층과 가열된 영역은 부품의 가열되지 않는 체적내로 열전도 되면서 급냉된다. 전자 비임 용접인 경우 비임 전력이나 전력 밀도가 높지만 표면경화에 전자 비임이 적용될 때 초기 용융이 필요없기 때문에 전력 밀도는 용접의 경우보다 낮은 $10^3 \sim 10^4$ w/cm² 범위이며 이로 인해 가열속도는 약 $10^3 \sim 10^4$ (10⁵) °C/s이다. 냉각속도는 보통 $10^3 \sim 10^5$ °C/s범위로 된다. 비임의 전력밀도 분포와

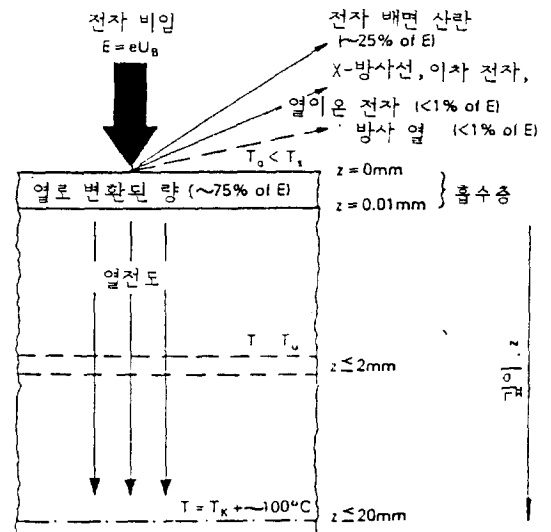


그림 1. 비임의 운동에너지 E가 어떻게 전파되는지를 나타내는 전자 비임의 부품 표면 위 충돌의 영향

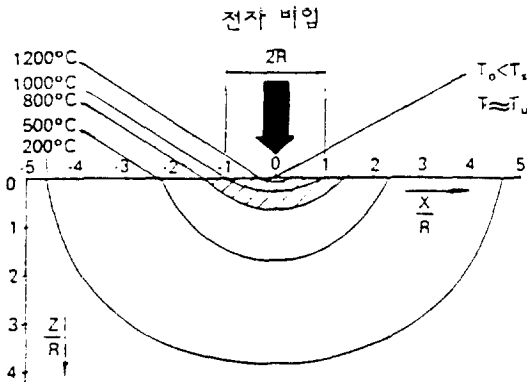


그림 2. 전자 비임의 정상 상태의 작용에 의해서 형성된 온도 분포

비임의 원형 단면때문에 부품내에서 등온선은 그림 2에서 보는 바와 같이 렌즈 모양으로 되어 있다. 따라서 렌즈 모양으로 된 경화영역이 형성되며 부품 표면 상에서는 그림 3에서와 같이 경화영역의 형태를 점상이나 선상으로 다양하게 할 수 있다. 점상 경화인 경우 비임이 한 지점에 작용하고 주어진 일정 시간이 경과하면 다음 지점으로 이동한다. 선상 경화에 대해서는 부품을 비임 작용점 아래에서 이동시킨다. 점이나 선의 연장 부분은 비임의 초점거리를 조절하여 가열할 수 있으며 점 또는 선의 사이가 좁은 부분은 이미 경화된 영역이 열의 영향을 받아 템퍼링(tempering) 효과가 일어날 수도 있고 중복된 부분은 여러번 경화될 수도 있다. 이러한 현상은 적절한 비임 안내장치를 이용하여 가열된 인접 영역이 마르텐사이트 변태 온도 이하로 냉각하지 않도록 하여 간단히 방지할 수 있다. 비임의 초점 거리를 조절하여 가열할 수 있는 것 보다 더 넓은 면적을 경화하려면 비임을 2차원적 방법으로 부품 표면 위에 기울어지도록 조정해야 한다. 이러한 방법은 컴퓨터 제어에 의해서 필요한 모양의 라스터 무늬(raster pattern)를 얻어서 프로그램에 의한 싸이클 형태로 처리하고자 하는 표면상의 각점을 효과적으로 가열할 수 있다.

3. 전자 비임 열처리 장치

전자 비임 열처리에 있어서 가속전자의 농도가 대단히 높은 비임을 사용하여 부품 표면의 국부적 영역을 가열한다. 전자 비임은 그림 4에 나타낸 바와 같이 전

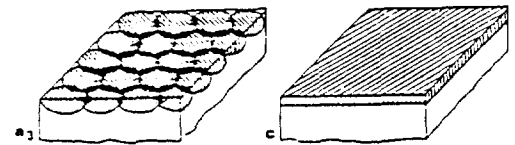
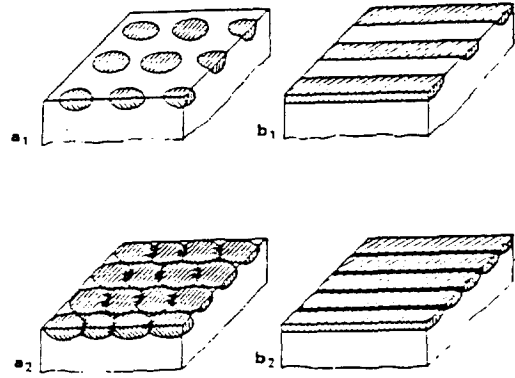


그림 3. 전자 비임 표면경화 영역의 여러가지 형상

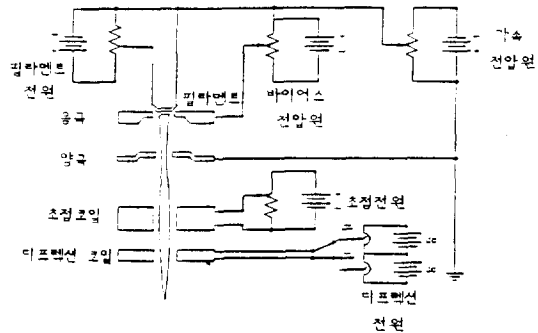


그림 4. 42 kw 전자 총의 구조

자 총(electron gun)내에 있는 필라멘트를 매우 높은 온도로 가열했을 때 필라멘트로 부터 자유 전자가 형성되고 이들 전자가 음극과 양극 간의 가속 전압에 의해서 가속되고 평행 조정되어 얻어진다. 이와같이 형성된 높은 에너지를 가진 비임은 양극에 있는 작은 직경의 구멍을 통과한다. 서로 인접한 전자 사이에 일어나는 상호 반발 현상때문에 양극을 통과한 다음에도 비임을 평행 조정할 필요가 있으며 초점코일(focus coil)에 의해서 추가 조정할 수 있고 전자 총과 부품간의 거리도 변화시킬 수 있다. 디플렉션 코일(deflection coil)은 다시 조정 결속된 비임을 부품 표면의 지정된 위치로 맞추어

가열한다. 전자가 발생되고 가속되는 장치 내부에는 높은 진공이 필요한데 이는 전자발생기의 산화를 방지하고 전자가 아직 저속일 때 전자들 사이의 간섭을 없애는데 목적이 있다. 따라서 전자 총 내부는 진공펌프로 의해서 10^{-5} torr의 진공도를 유지할 필요가 있다.

전자 비임 열처리에 있어서 에너지 교환은 단지 비임을 구성하고 있는 전자가 운동 에너지를 부품 재료의 원자 구조에 열의 형태로 전환하는 것이다. 일반적으로 전력밀도가 3.1 kw/cm^2 일때 국부적으로 가열하는 표면 경화열처리에 적합하며 전자 비임의 에너지를 이 크기로 조정하기 위하여 라스터 무늬에 의해서 프로그래밍하여 사용한다. 전자 비임 열처리가 이용할 수 있게 된 것도 전자 비임 장치에서 프로그래밍할 수 있는 컴퓨터 제어 시스템이 개발되었기 때문이다. 이 제어 시스템은 전자 비임을 정확하게 한 위치에서 다른 위치로 전자석적으로 조작하여 라스터 무늬를 형성하고 동시에 각 위치에서 입력 에너지를 제어한다. 전자 비임은 각 위치에서 일정 시간 간격(최소 20×10^{-6} 초) 동안 조사한 다음 높은 속도로 다음 위치로 이동된다. 경화할 각 표면의 모양과 일치하는 라스터 무늬를 형성케 하여 전체 열처리 싸이클 중 매 초 당 500 회의 속도로 반복되어진다.

전자 비임 전력은 시간의 함수로 제어되는데 초기 전력 밀도는 경화할 재료의 용점 바로 아래 온도에 해당하는 오스테나이트화 온도(austenitizing temperature)로 표면을 급속히 가열하는데 충분하도록 조정한다. 따라서 온도 구배가 표면에서 내부로 감에 따라 형성되며 시간이 경과함에 따라 이 구배의 깊이가 증가한다. 온도 구배가 깊어질수록 표면 온도는 증가하며 따라서 표면온도를 용점 바로 아래로 유지하기 위하여 온도를 상승을 컴퓨터를 이용하여 시간에 따라 표면 전력 밀도를 줄여서 억제하면서 빨리 대응하게 된다.

오스테나이트화 온도는 용점 바로 아래 온도로 유지하여 탄소의 확산 속도를 증가시키고 가열시간을 짧게 하는 점을 이용하며 조직의 오스테나이트화와 철탄화물의 고용에 소요되는 최소시간은 보통 1/3~1/2 초이다. 이 가열시간 동안에 재료는 약 0.25 mm의 깊이까지 충분히 가열되어 전자 비임 에너지가 차단되고 자기 퀘칭이 되면 부품이 경화한다. 탄소를 함유하는 오스테나이트가 필요한 깊이 만큼 형성하면 전자 비임의 전력을 끄며 부품 전체의 온도가 일정하게 될 때까지 열이 부품 내부로의 흐름이 계속된다. 이 열의 전달속도는 대

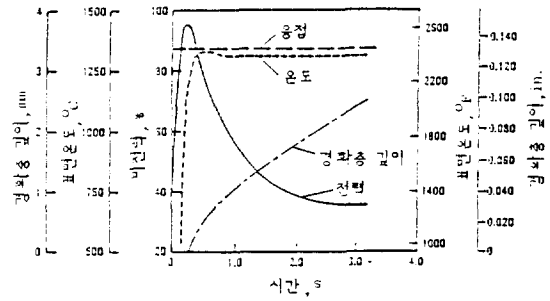


그림 5. 열처리 시간에 따른 전자 비임의 입력 에너지의 변화

단히 빨라서 임계 냉각속도(critical cooling rate)보다 높으며 따라서 그림 5에서 나타낸 바와 같이 오스테나이트를 단단한 마르텐사이트 조직으로 변태시켜 필요한 경화 깊이를 얻을 수 있다. 라스터 무늬는 고정식과 이동식이 있으며 고정식 무늬(static pattern)는 부품과 무늬사이에 상대적 이동이 없이 무늬의 형상을 일정하게 나타낸다. 이동식 무늬(traveling pattern)는 넓은 표면을 열처리할 때 사용되며 특정한 형상의 무늬를 부품에 나타내어 이동하는 방법은 라스터 무늬를 이동하거나 또는 부품을 이동하여 열처리한다.

4. 경화층 깊이의 조절

경화층 깊이는 간단히 시간의 함수로 표시된다. 표면에 가해진 열이 전도에 의해서 재료 내부로 이동하기 때문에 가열된 표면을 임계온도 이상의 온도에서 유지시간이 길수록 열이 더 깊이 침투하며 따라서 경화층 깊이가 더 증가한다. 더욱이 표면온도가 급속히 상승하고 온도가 충분히 높아서 탄소가 고용체 내에 빨리 고용되면 열영향 영역(heat-affected zone)이 거의없이 상당히 깊은 경화층을 얻을 수 있다.

표면경화처리를 완전하게 하려면 가열된 부분이 최대 경도를 얻을 수 있도록 급냉되어야 한다. 이것이 자기 퀘칭하는 재료에 전자 비임 열처리를 적용하는데 제한점이다. 열을 표면에서 부품 내부로 빨리 전달할 수 있도록 경화하는 표면 아래 질량이 충분히 있어야 한다. 열의 전달은 급속히 일어나도록 하여 퍼얼라이트(pearlite)의 형성을 방지하고 베이나이트(bainite) 변태가 시작하기 전에 마르텐사이트 변태개시온도 이하로 내려야 한다. 이러한 자기 퀘칭 과정에서 오스테나이트의 퀘칭이 내부로부터 외부로 일어나서 내부층에서 먼

저 경화한다. 따라서 마르텐사이트 변태가 일어날 때 표면에 적절한 압축잔류응력이 형성하여 피로한도를 증가시킨다.

5. 전자 비임 열처리의 장점

전자 비임 열처리는 필요한 위치에 표면경화처리할 때 에너지의 크기를 부품에 적절하게 공급하도록 조절할 수 있는 정확하고 간결한 처리법으로서 다음과 같은 장점을 들 수 있다.

- (1) 에너지의 이동속도가 빠르고 열처리할 부분의 면적을 최소로 제한하므로 에너지 사용량이 적다.
- (2) 에너지의 공급을 급속히 조절하고 열처리 필요 면적에만 선택적으로 제한하여 가열하므로 부품의 변형을 최소로 할 수 있다.
- (3) 높은 에너지를 급속히 이동케 하고 급냉을 할 수 있으므로 일반적으로 열영향 영역을 매우 작게 할 수 있다.
- (4) 라스터 무늬를 부품 위로 이동하거나 부품을 무늬아래에서 이동하면서 큰 표면적을 짧은 시간 내에 열처리할 수 있으므로 표면경화의 적용성이 높으며 경화층 깊이에 따라서 이동속도를 150 cm/min 이상으로 제어할 수 있다.
- (5) 자기 퀴칭 현상으로 인하여 유연성이 있는 오스테나이트가 경도가 높은 마르텐사이트로 변태할 때 표면층의 팽창이 일어나고 이 팽창은 인접층의 비항복현상의 저지력에 의하여 표면에 압축응력이 형성한다.
- (6) 경화층에서 얻을 수 있는 최대경도는 자기 퀴칭이 일반퀴칭보다 효과적이므로 일반 열처리법에 의해서 얻을 수 있는 것 보다 더 높다.
- (7) 가속 전자 비임은 높은 에너지를 경화할 표면에 공급할 수 있으며 철강 재료의 열전도 특성이 비교적 낮으므로 가열시간이 0.5~1초 정도로 매우 짧다.
- (8) 진공 분위기에서 전자 비임 열처리가 가능하므로 표면의 변색없이 깨끗하게 경화할 수 있다.

6. 응용범위

- (1) 재료는 필요한 경화층 경도를 얻을 수 있도록 적합한 탄소량을 함유해야 한다.
- (2) 전자 비임이 직진하여 열처리할 표면에 바로 닿을 수 있어야 하며 비임의 충돌각(impingement angle)은 적어도 25°이어야 한다.
- (3) 열처리할 부품을 진공로에서나 또는 1기압까지의 여러 압력에서 공기 또는 불활성 가스 중에서 경화할 수 있다. 열처리 생산 실적이 좋은 진공로의 내부 체적은 보통 0.02~0.11 m³이다.
- (4) 열처리할 부품의 표면은 최종치수로 절삭 또는 연삭이 완료되어야 한다. 열처리 후 연삭 가공이 필요한 경우 0.05~0.25 mm의 가공 여유를 두면 충분하다.
- (5) 부품의 크기는 열처리할 부분을 자기 퀴칭하는데 충분해야 한다. 부품의 자기 퀴칭 성능은 조성과 크기에 따라 다르며 경화능이 큰 강재는 중심까지 전체 경화가 가능하지만 보통 탄소강의 경우 경화할 부분 아래에 있는 체적은 경화층의 체적에 비해서 약 5배에서 8배 더 크게 되어야 자기 퀴칭 효과가 있으며 바람직한 전자 비임 열처리를 할 수 있다.

참고문헌

1. R. Jenker and M. Muller, Heat Treatment of Metals, Vol.15, April, 1988, p. 79
2. A.J.Hick, Heat Treatment of Metals, Vol.10, January, 1983, p.3
3. H.E. Cline and T.R. Anthony, J. of Applied Physics, Vol.48, No.9, 1977, p.3895
4. G. Saylegh, Heat Treatment of Metals, Vol.7, January, 1980, p.5
5. C. Fiorletta, Metals Handbook, Vol.4, 9th edition, 1981, p.518